



Главный редактор
Г.В. Добровольский



Международная научная конференция

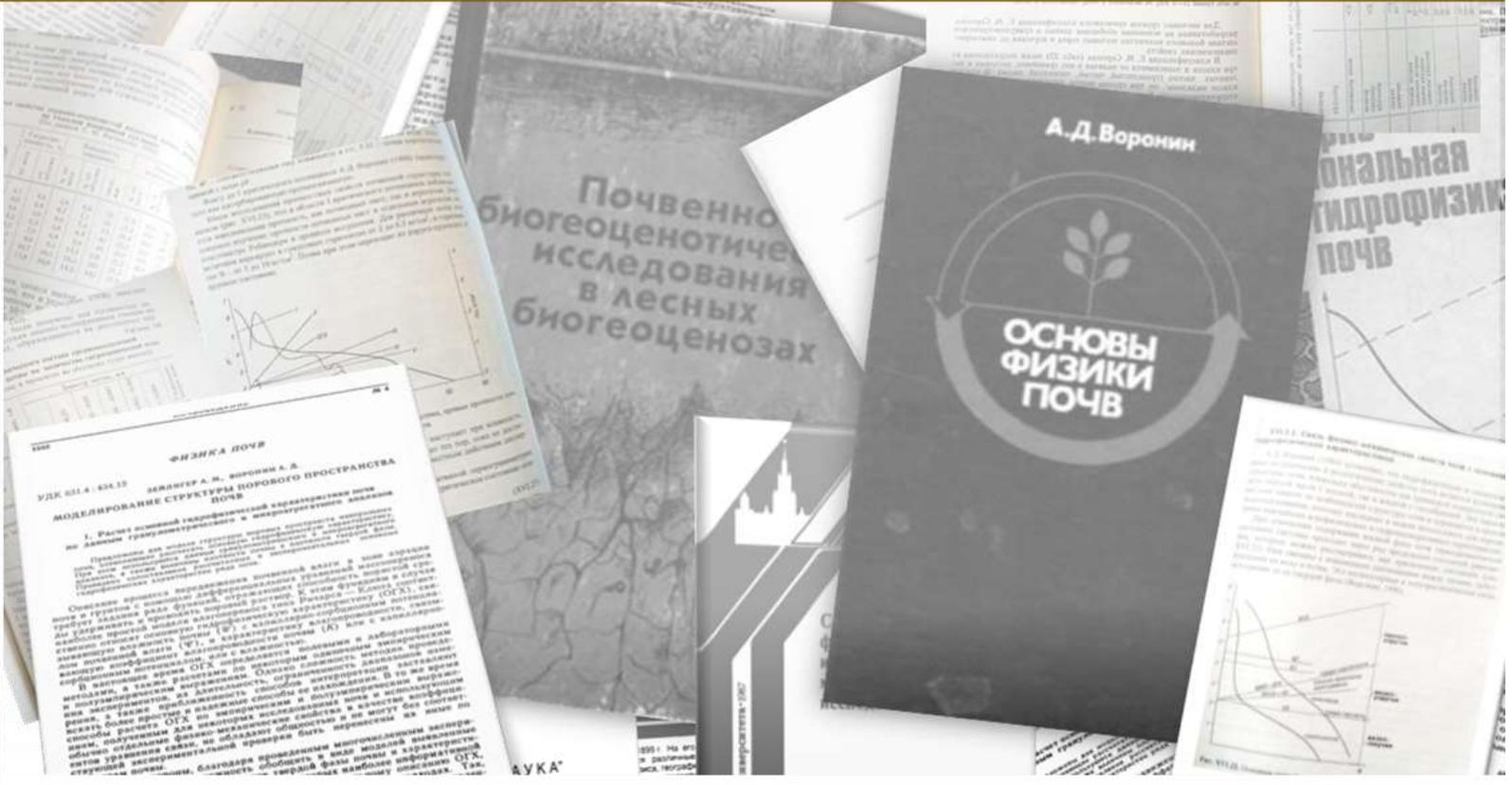


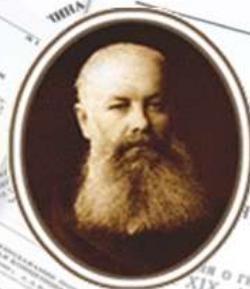
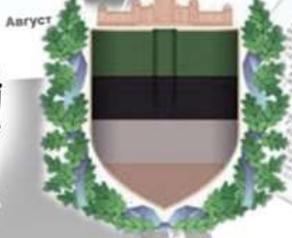
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
КОНЦЕПЦИИ ФИЗИКИ ПОЧВ:
РАЗВИТИЕ, СОВРЕМЕННЫЕ
ПРИЛОЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

*Посвящается 90-летию со дня рождения
профессора МГУ Анатолия Даниловича Воронина*

СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

27-31 мая 2019 г.
Москва, МГУ имени М.В.Ломоносова
факультет почвоведения





Главный редактор
Г.В. Добровольский



International Conference



KEY CONCEPTS OF SOIL PHYSICS: DEVELOPMENT, CURRENT APPLICATIONS AND FUTURE PROSPECTS

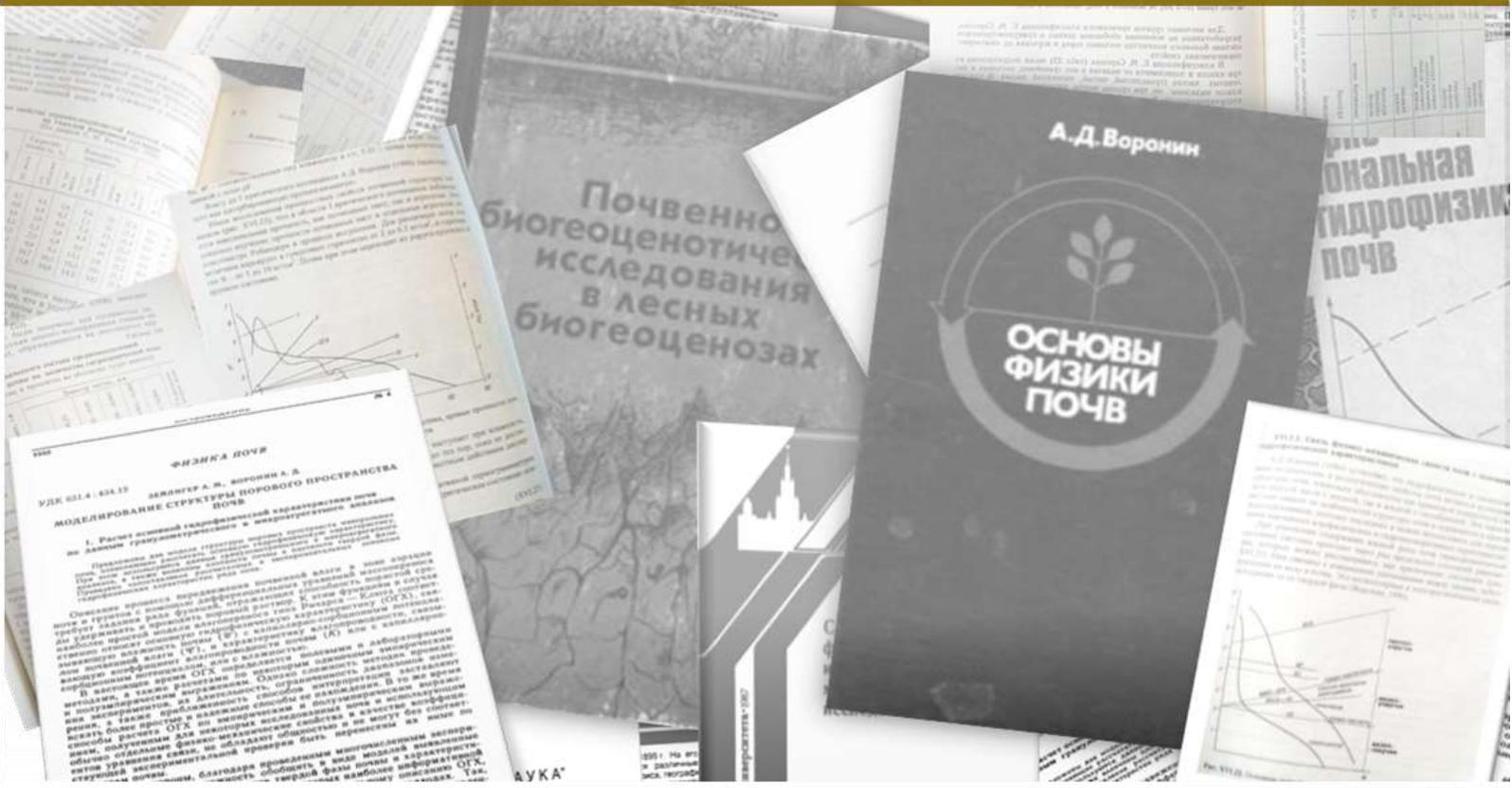
Organized to commemorate the 90th
anniversary of A. D. Voronin 's birth

CONFERENCE PROCEEDINGS

Moscow May 27-31, 2019

Lomonosov Moscow State University

Faculty of Soil Science



УДК 631.4(08)
ББК 40.3я43
Ф94

Ф94 Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Анатолия Даниловича Воронина: «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы», Москва, 27–30 мая, 2019 : сборник статей, [электронное издание сетевого распространения]. – М.: «КДУ», «Добросвет», – 2019. – 795 с. – doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0065. – URL: <https://bookonlime.ru/node/4660>

ISBN 978-5-7913-1108-5

Сборник содержит материалы докладов, представленных на Международной научной конференции, приуроченной к 90-летию со дня рождения профессора, заведующего кафедрой физики и мелиорации почв (1976–1998), декана факультета почвоведения (1989–1995) Московского университета Анатолия Даниловича Воронина. Научная программа конференции основана на междисциплинарности физики почв и посвящена вопросам современных и перспективных приложений фундаментальных концепций физики почв в почвоведении и смежных науках.

Proceedings of the International scientific conference, organized to commemorate the 90th anniversary of A. D. Voronin 's birth «Key concepts of soil physics: development, future prospects and current applications», Moscow, May 27–30, 2019. – М.: KDU, – 2019. – 795 p. – doi: 10.31453/kdu.ru.91304.0065. – URL: <https://bookonlime.ru/node/4660>

This publication contains all the materials that were sent to the International scientific conference «Key concepts of soil physics: development, future prospects and current applications». The conference is organized to commemorate the 90th anniversary of A. D. Voronin 's birth. Anatoly Danilovich Voronin, Professor, Head of the Department of the Soil Physics and Reclamation (1976–1998), Dean of the Faculty of Soil Science of Moscow State University (1989–1995). The scientific program of the conference is based on the interdisciplinary nature of soil physics and is devoted to issues of modern and promising applications of the fundamental concepts of soil physics in soil science and related sciences.

УДК 631.4(08)
ББК 40.3я43

Материалы конференции размещены в авторской редакции. Редакция не вносила коррективы в научные статьи. Ответственность за информацию, опубликованную в материалах, представленных в сборнике, несут авторы.

All materials contained in the book, published in the author's version. The editors do not make adjustments in scientific articles. Responsibility for the information published in the materials on book, are the authors. The articles are placed in the author's edition.

Онлайн-версия книги доступна по адресу: URL: <https://bookonlime.ru/node/4660>

Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru

© МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 2019

© Авторы статей, 2019

© «КДУ», 2019

ISBN 978-5-7913-1108-5



СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ | 16 |
| Gülser C. EFFECT OF FARMYARD MANURE ON SOIL STRUCTURE..... | 17 |
| Русаков А.В., Попов А.И., Позднякова А.Д. КАТЕНАРНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОЧВ И ПОРОД МАКРОСКЛОНА СЕВЕРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ КЛИНСКО-ДМИТРОВСКОЙ ГРЯДЫ И ВЕРХНЕВОЛЖСКОЙ НИЗИНЫ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ | 22 |
| Скворцова Е.Б. ФОРМА И ОРИЕНТАЦИЯ ПОЧВЕННЫХ ПОР. В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А.Д. ВОРОНИНА О СТРУКТУРЕ И ПОРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПОЧВЫ | 28 |
| Смагин А.В. РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А.Д. ВОРОНИНА В ТЕРМОДИНАМИКЕ ПОЧВЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... | 32 |
| Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Ежелев З.С., Кокорева А.А., Сусленкова М.М., Хмелева М.В., Быкова Г.С., Гасина А.И. АРХИТЕКТУРА ПОЧВ: РАЗВИТИЕ СТРУКТУРНО- ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА А.Д. ВОРОНИНА | 41 |
| Харитонова Г.В., Шеин Е.В., Крутикова В.О., Остроухов А.В. ВТОРИЧНЫЕ КАРБОНАТЫ В ЭДАФИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМ..... | 47 |
| Шеин Е.В., Дембовецкий А.В. КОНЦЕПЦИЯ «СЕКУЩИХ» А.Д. ВОРОНИНА И ЕЁ СОВРЕМЕННОЕ ЗВУЧАНИЕ..... | 51 |
| Шеуджен А.Х., Гуторова О.А., Шеин Е.В., Романенков В.А. АГРОГЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧВ РИСОВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ..... | 53 |
| СЕКЦИЯ 1. ФИЗИКА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЧВ | 58 |
| Orhan DENGİZ RELATIONSHIP BETWEEN MINERALOGICAL AND SOME PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS DEVELOPED ON BASALTIC PARENT MATERIAL ON DIFFERENT SLOPE POSITION | 59 |
| Golovko L.A., Pozdnyakova A.D., Pozdnyakov L.A. ELECTRICAL RESISTIVITY: UNIVERSAL AND FUNDAMENTAL SOIL PROPERTY | 63 |
| Gülser C., Dengiz O., Kızılkaya R. EFFECT OF LIME CONTENT ON SOIL MECHANICAL PROPERTIES | 68 |
| Gülser C., Kızılkaya R., Dengiz O. EFFECT OF TEA WASTE APPLICATION ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES..... | 73 |
| Mikailsoy F.D., Shein E.V., Erol A.S., Erşahin S., Er F. DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALLUVIAL CARBONATE SOILS (CHUMRA REGION, CENTRAL ANATOLIA, TURKEY) IN FIELD AND LABORATORY COLUMN EXPERIMENTS | 78 |
| Vodyanitskii Yu.N., Savichev A.T., Morgun E.G. ANALYSIS OF SOIL GRAIN-SIZE FRACTIONS IDENTIFIED BY LASER DIFFRACTION DECONVOLUTION | 87 |
| Yudina A.V. COMPOSITION AND DYNAMICS OF SOIL MICROSTRUCTURE LEVELS | 91 |



| | |
|---|------------|
| Абросимов К.Н., Горбов С.Н. ОТКРЫТАЯ И ЗАКРЫТАЯ ПОРИСТОСТЬ КАК ИНДИКАТОРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ | 93 |
| Абросимов К.Н., Голованов Д.Л., Лебедева М.П. МИКРОТОМОГРАФИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КОРКОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ПУСТЫННЫХ ПОЧВ – КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ ИХ ГЕНЕЗИСА И ДИАГНОСТИКИ | 96 |
| Анисимов В.С., Санжаров А.И., Корнеев Ю.Н., Анисимова Л.Н., Фригидов Р.А., Фригидова Л.М., Пименов Е.П., Кочетков И.В. ИЗУЧЕНИЕ КИСЛОТНОСТИ И КАТИОННОГО СОСТАВА ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРОВ, ИЗВЛЕЧЕННЫМИ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТРИЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ | 101 |
| Басевич В.Ф., Витязев В.Г., Макаров И.Б., Сапожников П.М. УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ДО И ПОСЛЕ ПЛАНИРОВКИ..... | 106 |
| Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В., Тагивердиев С.С. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ РОСТОВАНА-ДОНУ | 109 |
| Болдырева В.Э., Морозов И.В., Безуглова О.С. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ | 114 |
| Бутылкина М.А., Умарова А.Б., Званцова В.А., Сусленкова М.М., Початкова Т.Н. ОСНОВНАЯ РЕОЛОГИЧЕСКАЯ КРИВАЯ КАК ИНДИКАТОР МИКРОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТОЗЕМОВ..... | 119 |
| Голованов Д.Л., Сорокин А.С., Конюшкова М.В., Красильников П.В., Агаджанова Н.В., Головлева Ю.А., Сидорова В.А. СВЯЗЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕНЕТРАЦИИ С ДИНАМИЧЕСКИМИ, ГЕНЕТИЧЕСКИМИ И ЛИТОГЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНОЙ И ПОЛУПУСТЫННОЙ ЗОН | 125 |
| Гуторова О.А., Зубкова Т.А., Шеуджен А.Х. УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ПОЧВ РИСОВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ | 130 |
| Дармаева Н.Н., Билтуев А.С. ВОДОПРОЧНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ К ЭРОЗИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ В СКЛОНОВОМ РЕЛЬЕФЕ..... | 135 |
| Дядькина С.Е., Кондрашкина М.Е., Кротов Д.Г. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРИИРОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ И ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ТРЁХ РАЙОНОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ | 140 |
| Зубкова Т.А. «МОСТЫ» МЕЖДУ МИРОМ МИКРО И МАКРОЧАСТИЦ В ПОЧВЕ | 144 |
| Ковалева Н.О., Ковалев И.В. ХАРАКТЕРИСТИКА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ БРЯНСКОГО ОПОЛЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИХ ПОЛИГЕНЕТИЧНОСТИ..... | 148 |
| Которова М.С., Умарова А.Б., Початкова Т.Н. ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ И ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИ ВОВЛЕЧЕНИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ | 153 |
| Кошельков А.М., Тюгай З., Крутикова В.О., Харитоновна Г.В. СМАЧИВАЕМОСТЬ РЕЧНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ | 159 |



| | |
|---|------------|
| Мигдисова И.А., Абросимов К.Н., Шеин Е.В. ГИСТЕРЕЗИС ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ: ВЗАИМОСВЯЗЬ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ..... | 165 |
| Михайловская Т.О., Шваров А.П., Федотов Г.Н., Бычков В.Л., Черников В.А., Дешко К.И. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА СВОЙСТВА ПОЧВ | 167 |
| Самофалова И.А. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВ В ВЫСОТНЫХ ЛАНДШАФТАХ СРЕДНЕГО УРАЛА (ХРЕБЕТ БАСЕГИ) | 172 |
| Савоськина О.А., Шевцов В.А., Заверткин И.А. ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОПРОЧНЫХ АГРЕГАТОВ В БЕССМЕННОМ ЧИСТОМ ПАРУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ..... | 178 |
| Салимгареева О.А., Которова М.С. ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ ПЕСКА И ИЛА НА МИКРОСТРУКТУРУ И РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ | 183 |
| Симонова Ю.В., Федорова Н.Н., Романов О.В. ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ ТЯЖЕЛОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА В РЕЗУЛЬТАТЕ АГРОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ | 189 |
| Старцев В.В., Хайдапова Д.Д., Дымов А.А. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ РАЗНЫХ ВЫСОТНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЯСОВ ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА..... | 193 |
| Сусленкова М.М., Умарова А.Б., Гасина А.И., Бутылкина М.А., Кокорева А.А. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ УРБАНОЗЕМОВ РАЗНОГО СТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ Г. МОСКВЫ | 197 |
| Тюгай З., Иванов А.В., Шваров А.П., Бутылкина М.А. СОСТАВ И СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ТЕМНОГУМУСОВОЙ ПОЧВЫ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ, РАЗВИТОЙ НА ОТЛОЖЕНИЯХ ТРИАСА..... | 203 |
| Тюгай З. Быкова Г.С., Милановский Е.Ю, Дембовецкий А.В., Мешалкина Ю.Л. ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ: КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ | 208 |
| Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А. ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВ | 213 |
| Хан К.Ю., Сон Б.К. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ | 218 |
| Цветков С.А., Мамонтов В.Г., Билько З.В., Лазарев В.И. ВЛИЯНИЕ БЕССМЕННЫХ ПАРА И ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО КУРСКОЙ ОБЛАСТИ | 222 |
| Шеин Е. В., Верховцева Н.В., Быкова Г. С., Сусленкова М.М. ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОАГРЕГАТОВ В СУСПЕНЗИИ КАОЛИНИТА С БАКТЕРИЯМИ <i>VACILLUS VELEZENSIS</i> | 226 |
| Шваров А.П., Тюгай З., Иванов А.В., Лебедев И.Е ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОЧВ, КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ СФОРМИРОВАННЫХ НА ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТРИАСА..... | 232 |



| | |
|---|------------|
| СЕКЦИЯ 2. ПОЧВЕННАЯ ГИДРОЛОГИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ПОЧВОВЕДЕНИИ | 238 |
| Abdelmonem Mohamed Amer WATER MOVEMENT IN RELATION TO PORE SIZE DISTRIBUTION IN CULTIVATED CLAY SOILS IN THE NILE DELTA | 239 |
| Mady A.Y., Shein E.V. DEVELOPMENT OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR ESTIMATION SOIL HYDRO AND THERMAL PHYSICAL PROPERTIES | 247 |
| Анциферова О.А. МОНИТОРИНГ РЕЖИМА ВЛАЖНОСТИ БУРОЗЕМОВ НА АВТОНОМНЫХ ПОЗИЦИЯХ РЕЛЬЕФА | 251 |
| Белик А.А., Кокорева А.А., Колупаева В.Н., Ежелев З.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ В ПОЧВАХ БОЛЬШИХ ЛИЗИМЕТРОВ МГУ | 255 |
| Болотов А. Г., Шеин Е. В СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ПОЧВЕ | 261 |
| Быховец С.С., Шашков М.П., Фролов П.В., Зубкова Е.В., Иванова Н.В., Шанин В.Н. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕМКОСТНЫХ ВЛАГОМЕРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЛАЖНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЧВ | 266 |
| Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ФИЗИКИ ПОЧВ | 271 |
| Данилова Т.Н. ПОЛИМЕРНЫЕ ГЕЛИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВ | 276 |
| Даутоков И.М., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СВЕТЛО-СЕРЫХ ОГЛЕЕННЫХ ПОЧВ ТАМБОВСКОЙ РАВНИНЫ | 280 |
| Егоров Ю.В., Судницын И.И., Кириченко А.В. ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ | 285 |
| Ильина Д.А., Гасина А.И. ДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ И РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В МОНОЛИТНЫХ И НАСЫПНЫХ ОБРАЗЦАХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ РАЗНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА: МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ | 289 |
| Кокорева А.А., Белик А.А., Колупаева В.Н., Ежелев З.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОЧВАХ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВ | 290 |
| Кузьмин И.Ю., Ивонин Д.А., Федотов А.Б., Шеин Е.В., Умарова А.Б., Грачёв Е.А. АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В ПОЧВЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЕЁ МЕЗОСТРУКТУРЫ | 296 |
| Колупаева В.Н., Кокорева А.А., Белик А.А., Бондарева Т.А., Астайкина А.А., Нюхина И.В. ОЦЕНКА РИСКА ТРЕХ ПЕСТИЦИДОВ ДЛЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ ОПЫТОВ | 305 |
| Моисеев К.Г., Терлеев В.В. КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВЫ | 310 |



| | |
|--|------------|
| Мухина И.М., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ | 315 |
| Ольчев А.В., Мухартова Ю.В., Дьяченко М.С., Мангура П.А., Мамкин В.В., Курбатова Ю.А. ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕНОСА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ "ПОЧВА - РАСТИТЕЛЬНОСТЬ - АТМОСФЕРА" | 320 |
| Романенко К.А. СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ-ИССУШЕНИЯ | 325 |
| Романов Олег Васильевич ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РЕЖИМЫ СЕРЫХ ПОЧВ ЗАПОВЕДНИКА «БЕЛОГОРЬЕ» | 328 |
| Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. О НЕКОТОРЫХ НЕКОРРЕКТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ФИЗИКИ ПОЧВ | 332 |
| Сорокина Н.В., Шеин Е.В., Позднякова А.Д. ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНЫХ ПОЧВ | 337 |
| Суздалева А.В., Шеин Е.В. ОСНОВНАЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АГРЕГАТОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОДИСТОЙ ПОЧВЫ | 340 |
| Терлеев В.В., Топаж А.Г., Дунаева Е.А., Гиневский Р.С., Лазарев В.А МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВЫ С УЧЕТОМ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРЕЦИЗИОННЫХ НОРМ ОРОШЕНИЯ | 344 |
| Трегубова П.Н., Владимиров А.В., Васильев Т.А., Марахова Н.А, Васильева Н.А. УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЛАГОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛАГОЗАПАСОВ В ЛАНДШАФТ | 349 |
| M.G. Khratchenkov, E.M. Khratchenkov, R.M. Usmanov A NEW MODEL OF MASS TRANSPORT IN CLAYEY SYSTEMS | 354 |
| СЕКЦИЯ 3. АГРОФИЗИКА, АГРОХИМИЯ И ПОЧВЕННАЯ БИОТА КАК ТРИАДА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ УСЛОВИЙ | 358 |
| Kızılkaya Ridvan THE EFFECT OF AZOTOBACTER CHROOCOCCUM INOCULATION TO SOIL ON AGGREGATION | 359 |
| Kızılkaya Ridvan, Dengiz Orhan, Gülser Coskun SOME BIO-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SODIC VERTISOLS IN BAFRA PLAIN, TURKEY | 364 |
| Ibrahim Ortas, Barış Bulutekin and Feyzullah Öztürk RHIZOSPHERE AND NON-RHIZOSPHERE SOIL STRUCTURE DEVELOPMENT UNDER PHOSPHORUS FERTILIZATION APPLICATION..... | 369 |
| Ахмедова А.М., Гумматов Н.Г. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВЕТЛО- КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ В БОГАРНЫХ УСЛОВИЯХ ГОРНОГО ШИРВАНА | 380 |
| Бауэр Т.В., Пинский Д.Л., Минкина Т.М., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Манджиева С.С. ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ МЕДИ ЧЕРНОЗЕМАМИ РАЗЛИЧНОГО ГРАНЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА..... | 385 |
| Будажапов Л.В. КИНЕТИКА ТРАНСФОРМАЦИИ АЗОТА УДОБРЕНИЙ В АГРОЛАНДШАФТАХ ЗАБАЙКАЛЬЯ: КОНСТАНТА СКОРОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТЕНИЯМИ, РОСТА ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ И ПРЕВРАЩЕНИЙ В АЗОТНОМ БАЛАНСЕ | 390 |



| | |
|---|------------|
| Бучкина Н.П., Зинченко С.И., Рижия Е.Я., Павлик С.В., Хорн Р., Балашов Е.В. ОСНОВНАЯ ОБРАБОТКА ПОЧВ: РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ И ВЛИЯНИЕ НА ЭМИССИЮ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ | 394 |
| Васильченко А.В. МИКРОБНОЕ ПРОДУЦИРОВАНИЕ CO ₂ ПОЧВАМИ ПРИРОДНЫХ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ | 398 |
| Глушакова А.М., Максимова И.А., Качалкин А.В., Морозова А.И. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДРОЖЖЕВЫХ ГРИБОВ В ПОЧВАХ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА (НА ПРИМЕРЕ БИОГЕОЦЕНОЗОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА КАТ ТЬЕН)..... | 403 |
| Голиченков М.В., Максимова И.А., Закалюкина Ю.В., Дымова А.А., Чурилина А.Е., Кирюшин А.В. ГНЕЗДОСТРОИТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МУРАВЬЕВ КАК ФАКТОР ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ | 408 |
| Гончаров В.М. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНЫХ АГРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ | 413 |
| Конова И. А., Готовцев П. М., Лысак Л. В. РАЗНООБРАЗИЕ ПРОКАРИОТНЫХ СООБЩЕСТВ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ БОЛОТНО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ (МЕТОД ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ ГЕНА 16S РРНК) | 420 |
| Корчагин А.А., Зинченко М.К., Мазиров М.А., Винокуров И.Ю., Рагимов А.О. ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОВ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЬЯ..... | 424 |
| Красина Т.В. Степанцова Л.В. Красин В.Н. Хованова Л.В. ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ И АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ ЗНАМЕНСКОГО РАЙОНА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПЕРЕПОЛИВОВ ИХ НАВОЗНЫМИ СТОКАМИ | 429 |
| Лысак Л.В., Лапыгина Е.В., Соина В.С., Чекин М.Р. ФИЛЬТРУЮЩИЕСЯ ФОРМЫ ПРКАРИОТ И БАКТЕРИОФАГИ В ПОЧВЕННЫХ КОНКРЕЦИЯХ..... | 433 |
| Манучарова Н.А., Власова А.П., Каримов Т.Д., Зенова Г.М., Степанов А.Л. МЕТАБОЛИЧЕСКИ АКТИВНЫЙ ПРОКАРИОТНЫЙ КОМПЛЕКС НЕКОТОРЫХ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ РОССИИ | 437 |
| Матсуи К., Ватанабе Т., Кусаинова М.Д., Фунакава Ш. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВА ПОЧВЫ ОБСОХШЕГО ДНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ НА РОСТ И ВЫЖИВАНИЕ САКСАУЛА ЧЕРНОГО (HALOXYLON ARHYLLUM)..... | 439 |
| Минияров Ф.Т. ВЫЖИВАЕМОСТЬ ГЕОФИЛЬНЫХ ЛИЧИНОК ПЛАСТИНЧАТОУСЫХ ЖУКОВ (COLEOPTERA, SCARABAEIDAE) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ | 445 |
| Мудрых Н.М., Хамурджу М. ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПЕРМСКОГО КРАЯ..... | 449 |
| Николаев В.А., Щигрова Л.И. ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ | 454 |
| Полянская Л.М., Калимова И.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ И БИОМАССЫ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕТОДОМ КАСКАДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ..... | 458 |



| | |
|---|------------|
| <i>Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балашов Е.В.</i> РОЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ НА ЭМИССИЮ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ | 462 |
| <i>Тихонов В.В., Дроздова О.Ю., Карпухин М.М., Демин В.В.</i> УЧАСТИЕ ИОНОВ КАДМИЯ(II) И МЕДИ(II) В МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ В РАСТВОРАХ..... | 467 |
| <i>Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Жмурич В.А.</i> ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЭМИССИЮ СО ₂ ИЗ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА..... | 472 |
| <i>Четырбоцкий В.А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ В СИСТЕМЕ УДОБРЕНИЕ-ПОЧВА-РАСТЕНИЕ (НА ПРИМЕРЕ АЗОТА, ФОСФОРА И КАДМИЯ) | 478 |
| <i>Щепотьев В.Н., Дмитренко В.Н.</i> ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЙМЕННОЙ ПОЧВЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ..... | 482 |
| СЕКЦИЯ 4. МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ | 486 |
| <i>Barzegar Ganbary A., Oustan S., Aliasghar zad N., Neyshabouri M.R., Lotfollahi Markid A.</i> EFFECT OF SODIUM DODECYLBENZENE SULFONATE (SDBS) ON SOIL AGGREGATE STABILITY | 487 |
| <i>Kerimkulova M.R., Mansurov Z.A., Kozybaeva F.E., Oshakbayeva Zh.O.</i> ОЧИСТКА ПОЧВЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ БИОУГЛЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ | 492 |
| <i>Глазунов Г.П., Шестакова М.В.</i> ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭРОДИРОВАННЫХ ПОЧВ | 497 |
| <i>Горепекин И.В., Исакова С.А., Федотова М.Ф., Федотов Г.Н.</i> ВЛИЯНИЕ ПРЯДОСТОРИИ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ..... | 499 |
| <i>Демидов В.В., Панова И.Г., Шульга П.С., Ильясов Л.О., Ярославов А.А.</i> ПРОТИВОЭРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА, ОБРАБОТАННОГО ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ГУМАТОВ КАЛИЯ | 503 |
| <i>Красин В.Н. Никифорова А.С. Степанцова Л.В. Печуркини А.С.</i> ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ ЗНАМЕНСКОГО РАЙОНА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПЕРЕПОЛИВОВ ИХ НАВОЗНЫМИ СТОКАМИ..... | 508 |
| <i>Кременецкая И.П., Терещенко С.В., Алексеева С.А., Мосендз И.А., Слуковская М.В., Иванова Л.А., Михайлова И.В.</i> МЕЛИОРАНТЫ ВЕРМИКУЛИТ-ЛИЗАРДИТОВОГО СОСТАВА ИЗ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ..... | 512 |
| <i>Ковалев И.В.</i> ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОСУШЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ДРЕНАЖА* | 518 |
| <i>Никифорова А.А., Флейс М.Э., Казанцев Н.Н.</i> МУЛЬТИМАСШТАБНЫЕ ПОЧВЕННО-ЛАНДШАФТНЫЕ КАРТЫ КАК ОСНОВА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МЕЛИОРАЦИИ ПОЧВ..... | 523 |



| | | |
|--|---|------------|
| Панова И.Г., Хайдапова Д.Д., Киушов А.А., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. | ИНТЕРПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ГУМАТОВ КАЛИЯ И ПОЛИ(ДИАЛЛИЛДИМЕТИЛАММОНИЙ ХЛОРИДА) КАК СВЯЗУЮЩИЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА..... | 529 |
| Печуркин А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. | ВЛИЯНИЕ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГУМУСНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО ТАМБОВСКОЙ НИЗМЕННОСТИ..... | 534 |
| Д.Л.Пинский, Т.М. Минкина | К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ТРАНСФОРМАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ..... | 538 |
| Симонова Ю.В., Русаков А.В. | ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ ГИДРОМОРФНОГО ЗАСОЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЯРОСЛАВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ..... | 542 |
| Федотов.Г.Н., Горепкин И.В. | АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ И ПОИСК МЕТОДОВ АЛЛЕЛОМЕЛИОРАЦИИ..... | 547 |
| Хитров Н.Б., Rogovneva Л.В. | КРИВЫЕ УСАДКИ МОНОЛИТОВ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ СОЛОНЦОВ СЛИТИЗИРОВАННЫХ..... | 551 |
| Хованова Е.В. Степанцова Л.В. Красина Т.В. Красин В.Н. | ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕРНОЗЕМОВ ВЫЩЕЛОЧЕННЫХ И ТЕМНО- СЕРЫХ ПОЧВ ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ..... | 556 |
| Черкас С.М., Зайдельман Ф.Р., Дзизенко Н.Н. | ВЛИЯНИЕ ГЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА И ВЫНОС ИЗ НИХ КРЕМНИЯ, КАЛЬЦИЯ И ЖЕЛЕЗА С ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИМИ ВОДАМИ (МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)..... | 560 |
| СЕКЦИЯ 5. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧВ..... | | 565 |
| Güler Sümeyye, Turgut Bülent, Hangişi Aktan | DETERMINING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL QUALITY INDEX IN A WATERSHED..... | 566 |
| Shahbazi F., McBratney A.B. | USING R AND LANDSDAT-8 OLI IMAGERY FOR DIGITAL SOIL CLAY MAPPING IN A FIELD SCALE..... | 574 |
| Fomin Dmitry, Karsanina Marina, Gerke Kirill, Yudina Anna, Abrosimov Konstantin | INCREASING SOIL STRUCTURE DIVERSITY UNDER AFFORESTATION..... | 578 |
| Бухонов А.В. | ДИНАМИКА КЛИМАТА В ГОЛОЦЕНЕ И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ В ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЕ..... | 580 |
| Глазунов Г.П., Евдокимова М.В., Титарев Р.П., Шестакова М.В. | ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВРЕМЕННОГО ХОДА НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ..... | 585 |
| Гранина Н.И., Мартынова Н.А., Киселева Н.Д. | ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПРИБАЙКАЛЬЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В РЕГИОНЕ..... | 590 |



| | |
|--|------------|
| Гумматов Н.Г. ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ В РАЗЛИЧНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕГИОНАХ АЗЕРБАЙДЖАНА..... | 596 |
| Каграманова Т.М. ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЛАНДШАФТОВ ГОБУСТАНА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ | 601 |
| Кондрашкина М.И., Кондрашкин Б.Е., Кротов Д.Г., Дядькина С.Е., Самсонова В.П. ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА..... | 606 |
| Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ЕЕ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ЗОЛЬНОСТЬЮ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ О. САХАЛИН | 609 |
| Мазиров М.А., Матюк Н.С, Полин В.Д. ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ | 614 |
| Mikheeva I.V. INFORMATION INDICATORS OF SOIL TEXTURE..... | 618 |
| Рагимов А.О., Бубякин Р.И., Лукин С.М., Мазиров М.А. , Шентерова Е.М. ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПАХОТНЫХ И ИЛЛЮВИАЛЬНЫХ ГОРИЗОНТОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЕЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И УРОЖАЙНОСТЬ КУЛЬТУР | 624 |
| Русанов А.М., Булгакова М.А., Ануфриенко А.А. РОЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СТЕПНЫХ ПАСТБИЩ | 632 |
| Смирнова Л.Г., Шаповалов А.С., Украинский П.А., Михайленко И.И., Смирнов Г.В. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГУМУСА В ПОЧВАХ СКЛОНОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ | 634 |
| Н.Ф. Хохлов К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОНЯТИЯ «АГРОФИЗИЧЕСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТУР» В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ТОЧНОМУ ЗЕМЛЕДЕЛИЮ | 638 |
| СЕКЦИЯ 6. ПОЧВЫ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ И ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ. | 641 |
| Androkhanov V.A., Khozhina E.I. IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF TECHNOZEM UP TO 20 YEARS AFTER THE BEGINNING OF RECLAMATION | 642 |
| Delibacak S, Ongun A R TOTAL AND AVAILABLE HEAVY METAL CONCENTRATIONS OF TYPIC XERORTENT SOIL AFTER CONSECUTIVELY TWO YEARS TREATED SEWAGE SLUDGE APPLICATIONS..... | 647 |
| Азовцева Н.А., Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Кириченко А.В. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДИКТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ МЕГАПОЛИСА | 652 |
| Гаретова Л.А., Имранова Е.Л., Кириченко О.А., Кошельков А.М., Фишер Н.К., Климин М.А., Тюгай З. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ И БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ В ПОЧВОГРУНТАХ ПРОМЗОНЫ Г. ХАБАРОВСК..... | 655 |
| Горбов С.Н., Абросимов К.Н., Безуглова О.С., Скворцова Е.Б., Тагивердиев С.С. МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРОДСКИХ ПОЧВ | 658 |



| | |
|--|------------|
| Донерьян Л.Г., Водянова М.А., Воронина Л.П., Ушакова О.В. ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ | 663 |
| Имранова Е.Л., Кириенко О.А., Харитонова Г.В. ВЛИЯНИЕ ПАВОДКОВ НА ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ ЛУГОВЫХ ПОЧВ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ..... | 667 |
| Кондрашина В.С., Васильева Г.К. ВЛИЯНИЕ СОРБЕНТОВ НА СКОРОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ И ИХ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА..... | 670 |
| Кряжева Е.Ю., Лаптева Е.М., Боброва Ю.И. СОВРЕМЕННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА УХТА) | 675 |
| В.А.Кузнецов, И.М.Рыжова ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЧВЕННЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЕКРЕАЦИИ | 680 |
| Мартыненко И.А., Мешалкина Ю.Л., Гончарук Н.Ю. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛОТНОСТИ ГУМУСОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ..... | 684 |
| Маслов М.Н., Поздняков Л.А., Маслова О.А., Ежелев З.С. МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ТУНДРОВЫХ ПОЧВАХ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ..... | 689 |
| Прокофьева Т.В., Шишков В.А., Кирюшин А.В. КАРБОНАТНЫЕ АККУМУЛЯЦИИ В СПЕЦИФИЧЕСКИХ ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ | 693 |
| Раппопорт А.В., Умарова А.Б., Бутылкина М.А., Гасина А.И, Кутьева Е.В. ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ПРИРОДНЫХ ЗОН ПАРКЕ «ЗАРЯДЬЕ»: ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ФОРМИРОВАНИЯ..... | 697 |
| Сушкова С.Н., Дудникова Т.С., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Барбашев А.И., Попилешко Я.А., Дорохова Н.А., Дерябкина И.Г. ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВАХ ТЕРРИТОРИИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ..... | 705 |
| Тепеева А.Н., Глушакова А.М., Качалкин А.В. РАЗНООБРАЗИЕ ДРОЖЖЕВЫХ СООБЩЕСТВ ГОРОДСКИХ ПОЧВ | 707 |
| Трегубова П.Н., Копцик Г.Н., Степанов А.А. РЕМЕДИАЦИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ: ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ..... | 711 |
| Фаустова Е.В., Корытина М.А., Мороз Н.А. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКТОЗЕМОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА ЗЕЛеноЙ КРОВЛИ | 717 |
| СЕКЦИЯ 7. | 721 |
| ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ВОПРОСЫ КРИОГЕНЕЗА | 721 |
| Evgeny Abakumov FIELD ELECTROPHYSICS IN INVESTIGATION OF PERMAFROST AFFECTED SOILS | 722 |



| | |
|---|------------|
| Архангельская Т.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВ | 726 |
| Т.А. Архангельская, А.А. Гвоздкова ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ТОРФОПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ | 730 |
| Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М. ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕГО ОРГАНОГЕННОГО ГОРИЗОНТА ГРУБОГУМУСНЫХ СЕРОГУМУСОВЫХ ПОЧВ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ..... | 735 |
| Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ДВУХ В РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ..... | 739 |
| Ковда И.В., Рябуха А.Г., Поляков Д.Г. КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЧВАХ МЕЛОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ | 743 |
| Лапина Л.Э. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ..... | 748 |
| Лаптева Е.М., Виноградова Ю.А., Ковалева В.А., Перминова Е.М., Чернов Т.И. РОЛЬ КРИОГЕНЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ В ПОЧВАХ БУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ | 752 |
| А.А. Лебедев, Т.А. Архангельская, Т.Н. Початкова, З.Н. Тюгай ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ СЕРОГУМУСОВЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВ | 757 |
| Левашова Н.Т., Гандилян Д.В., Ольчев А.В. ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ НА СПЕКТРАЛЬНОЕ АЛЬБЕДО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С НЕОДНОРОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ | 763 |
| Макарычев С. В. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА | 768 |
| Решоткин О.В., Худяков О.И. ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ | 772 |
| Фролов Д.М. УЧЁТ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПРОСТОЙ СТЕФАНОВСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА..... | 777 |
| Штабровская И.М.,Зенкова И.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОЧВ ХИБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТЕРМОХРОНОВ | 781 |
| КРУГЛЫЙ СТОЛ. СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО И ПРИКЛАДНОГО ПОЧВОВЕДЕНИЯ: ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЦИФРОВОЕ (УМНОЕ) СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО | 785 |
| Железова С.В., Мельников А.В., Ананьев А.А. ПАХАТЬ ИЛИ НЕ ПАХАТЬ? ПЛЮСЫ И МИНУСЫ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ | 786 |
| Макаров О.А., Строков А.С. ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В РЕГИОНАХ | 791 |
| Сапожников П.М., А.К. Оглезнев МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ МЕЛИОРИРУЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ | 792 |





ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ



EFFECT OF FARMYARD MANURE ON SOIL STRUCTURE

Gülser C.¹

¹Faculty of Agriculture, Soil Science & Plant Nutrition Department of OMU, Samsun, Turkey
cgulser@omu.edu.tr

Annotation: The objective of this study was to determine the effect of farmyard manure (FYM) on soil structure. Manure was applied into a clay soil with four different doses (0, 2, 4 and 6%) in a randomized plot design with three replicates. FYM application reduced soil bulk density from 1.18 g/cm³ to 0.86 g/cm³, and penetration resistance (PNR) values from 1.79 MPa to 1.17 MPa. On the other hand, organic matter content, total porosity, gravimetric water contents at field capacity (FC) and permanent wilting point increased by FYM application. PNR values had significant negative correlations with total porosity, water content, and significant positive correlations with BD and relative saturation. While FYM application increased the amount of drainable pores from 18% to 46%, it decreased the amount of storage and residual pores in clay soil. Air filled pore space at field capacity moisture content increased from 18% to 46% by the application of FYM. The results indicated that increasing the application doses of farmyard manure improved soil structure with decreasing soil compaction and increasing porosity.

Keywords: Manure, penetration resistance, bulk density, pore distribution, relative saturation.

Introduction

Generally, soil physical degradation occurs with intensive soil cultivation due to loss of soil organic matter (Usovics and Lipiec, 2009). Manure application to soil increases soil organic matter content, available nutrients, water holding capacity, porosity, infiltration capacity, hydraulic conductivity, water stable aggregates, and decreases bulk density and surface crusting (Khaleel et al., 1981; Haynes and Naidu, 1998; Matsi et al., 2003). A measure of soil microstructure is an index of soil physical quality related with soil organic matter content (Dexter 2004). Penetration resistance is known as an easy and cheap measurement technique of soil strength, and widely used to assess soil compaction and the effects of soil management (O'Sullivan et al., 1987; Castrignanö et al., 2002). Numerous studies indicated that soil compaction depends on several factors such as; compressing loads of heavy machinery, type of parent materials, soil texture, moisture content, organic matter content, structural stability, sodicity and salinity (Soane, 1990; Baumgart and Horn, 1991; Barzegar et al., 1996; Hamza and Anderson, 2005). Addition of organic matter to soils increases water holding capacity with increasing field capacity and available moisture content (Gupta et al., 1977; Demir and Gülser, 2015). The water filled pore space in bulk soil is very important for soil aeration, microbial activity and plant growth (Carter and Johnston, 1989; Parkin et al. 1996). Using farmyard manure as an organic matter source helps to improve soil physical properties as well as increasing nutrients in soils. The objective of this study was to determine the effect of farmyard manure on soil structural properties and penetration resistance values of a clay soil.

Objects and methods

A field experiment was conducted at the Experimental Field of Agricultural Faculty in Ondokuz Mayıs University, Samsun Turkey. Farmyard manure (FYM) was incorporated within 0 - 15 cm soil depth as four different treatment rates (0, 2%, 4% and 6% of dry weight basis as 0, 36, 67 and 100 ton ha⁻¹, respectively) with three replications in a randomized plot design. Some chemical and physical characteristics of the soil were determined in soil samples taken from 0 to 15 cm depth of the field as follows; particle size distribution by hydrometer method (Day, 1965), bulk density by undisturbed soil core method (Demiralay, 1993), soil pH, 1:1 (w:v) soil:water suspension by pH meter, electrical conductivity (EC_{25°C}) in the same suspension by EC meter, organic matter content by Walkley-Black method and exchangeable cations by ammonia acetate extraction (Kacar,



1994). After eight months, soil samples were taken from each plot for the analyses and penetration resistance (PNR) in 0-15 cm depth was measured in each plot with five replications using a standard cone penetrometer which had a cone with a semi-angle of 30°, a base area of 2 cm² (Bradford, 1986). Moisture contents at the field capacity (FC) and the permanent wilting point (PWP) were determined equilibrating soil moisture of the saturated samples on the ceramic pressured plates at 33 kPa for 24 hours and 1500 kPa for 96 hours, respectively (Tüzüner, 1990). After volumetric water content values at sampling time, FC and PWP were determined multiplying gravimetric water contents by the bulk densities, the relative saturation (RS) values at sampling time, FC and PWP were calculated dividing volumetric water contents by total porosity values. Statistical analysis of the results was accomplished by standard analysis of variance, pairs of mean values compared by Duncan and correlations among the soil properties using SPSS statistics program.

Results and discussion

For the soil sampled from the field, the textural class is clay; it is moderate in organic carbon (OC) content, neutral in pH, and nonsaline according to the EC value (Table 1).

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil used in this study.

| | | | |
|---------------------------|-------|-------------|-------|
| Sand, % | 16.88 | OC, % | 2.46 |
| Silt, % | 20.17 | Na, cmol/kg | 0.15 |
| Clay, % | 62.93 | K, cmol/kg | 1.12 |
| pH (1:1) | 7.00 | Ca, cmol/kg | 34.00 |
| EC _{25°C} , dS/m | 0.69 | Mg, cmol/kg | 9.44 |

Increasing doses of farmyard manure (FYM) application increased soil OC content from 2.4% to 5.2% significantly at 1% level (Fig. 1). Increasing organic matter content due to application of FYM significantly decreased the bulk density values from 1.18 g/cm³ to 0.86 g/cm³ in the clay soil ($p < 0.05$). Total porosity (F) and penetration resistance (PNR) values significantly decreased with increasing doses of FYM application over the control treatment (Fig. 2). Numerous studies indicates that application of organic residues into soil decreases bulk density and increases total porosity with increasing the soil organic matter content (Gülser, 2006; Gülser et al. 2010; Candemir and Gülser, 2011; Demir and Gülser, 2015). Penetration resistance values varied between 1.79 MPa and 1.17 MPa (Fig. 2). The critical PR value for optimum root growth varies between 1.7 MPa and 2.0 MPa (Canarache, 1990; Arshad et al., 1996). In this study, when comparing with the PNR in control, the PNR values obtained in the FYM treatments were found to be lower than the suggested critical levels for root growth.

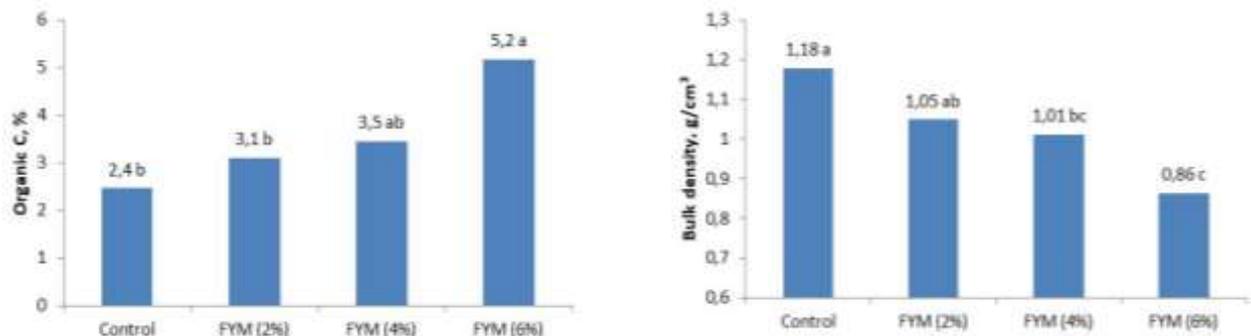


Fig. 1. Effect of farmyard manure (FYM) applications on organic C and bulk density.

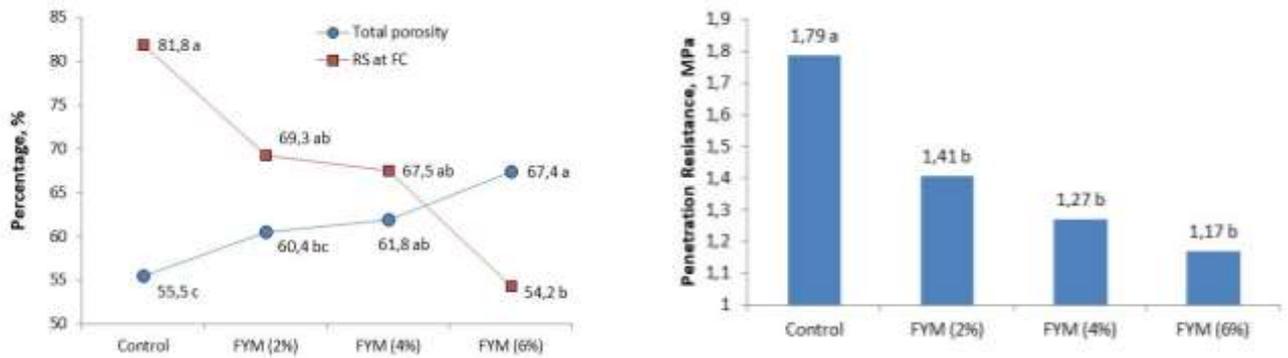


Fig. 2. Effects of farmyard manure (FYM) applications on total porosity, relative saturation (RS) at field capacity (FC) and penetration resistance.

Increases in FYM application doses significantly increased FC and PWP of the clay soil over the control treatment (Fig. 3). Demir and Gülser (2015) found that rice husk compost application increased the moisture contents of the soil at FC and PWP. Soil porosity, especially pore size distribution, is an important controlling factor for soil hydraulic properties and water retention. Soil pores are generally classified as: i) residual pores (smaller than 0.2 μm) related to the intra-aggregate arrangement, ii) storage pores (micro between 0.2 and 50 μm) where capillarity forces are predominant and iii) drainable pores (macro $>50 \mu\text{m}$); where the water flow occurs by convection due to gravitational forces (Brewer, 1964; Gonçalves et al., 2010). In this study, FYM application to the clay soil increased the amount of drainable pores from 18% to 46% and decreased the amount of storage and residual pores (Fig. 3). As a result of FYM application, increasing the total porosity including high amount of drainable or macro pores in clay soil decreased the relative saturation at FC from 81.8% in control to 54.2% in 6% of FYM treatment (Fig. 2). The high RS at FC in clay soil is not desirable for microbial activity and plant growth. Parkin et al (1996) reported that maximum microbial activity generally occurs when 60% of the soil pores are filled with water and the water-filled pore space is a good indicator of soil aeration. Carter and Johnston (1989) reported that as soil macro pore volume decreased from 14.5% to 8.5% (v/v) root disease severity in spring cereals increased from 50% to 72%. They concluded that it was associated with an increase in relative saturation from 60% to 74%. In this study, air filled pore space at FC increased from 18% to 46% with increasing the macro porosity by the application of FYM.

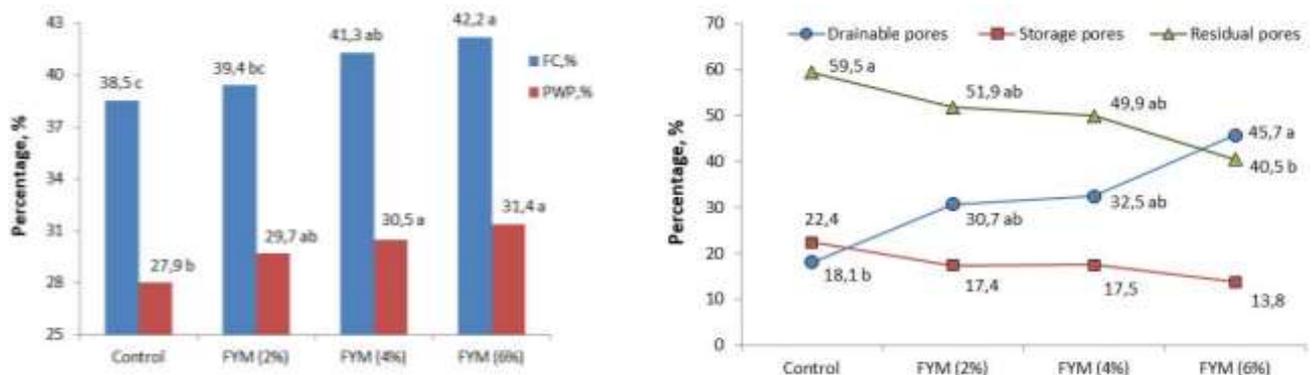


Fig. 3. Effects of farmyard manure (FYM) applications on field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), drainable, storage and residual pore distributions in clay soil.



The correlation matrix among the soil properties are given in Table 2. Soil OC content gave significant positive relations with F, FC, PWP and the amount of drainable pores, and significant negative correlation with BD, PNR, amount of storage and residual pores. Kushwaha et al. (2001) reported that soil organic C was strongly correlated with soil macro aggregates. In this study, FYM application increased the amount of drainable or macro pores in clay soil by decreasing bulk density. PNR had significant relations with the macro pores and F. It indicated that increments of macro pores in total porosity decreased PNR.

Table 2. Correlation matrix among the soil properties.

| | Store.Pore | Resid.Pore | OC | BD | F | PNR | FC | PWP | RSatFC |
|------------|------------|------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Drain.Pore | -0.902** | -0.977** | 0.683* | -0.987** | 0.987** | -0.666* | 0.603* | 0.695* | -0.998** |
| Store.Pore | | 0.790** | -0.657* | 0.842** | -0.843** | 0.739** | -0.353 | -0.803** | 0.902** |
| Resid.Pore | | | -0.648* | 0.988** | -0.987** | 0.582* | -0.682* | -0.592* | 0.977** |
| OC | | | | -0.731** | 0.732** | -0.760** | 0.655* | 0.772** | -0.683* |
| BD | | | | | -1.000** | 0.686* | -0.717** | -0.706* | 0.987** |
| F | | | | | | -0.689* | 0.717** | 0.707* | -0.987** |
| PNR | | | | | | | -0.638* | -0.907** | 0.666* |
| FC | | | | | | | | 0.627* | -0.603* |
| PWP | | | | | | | | | -0.695* |

Conclusions

As a result, FYM application reduced bulk density, increased total porosity and improved soil structural properties of the clay soil with increasing drainable pores, decreasing storage and residual pores in total porosity. PNR values decreased with increasing total porosity. Reducing PNR and RS at FC or increasing air filled pore space in clay soils by the FYM application are important for plant root growth, and microbial activity in sustainable agricultural practices.

References

- Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B. (1996) Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality, SSSA Special Publication*, vol. 49. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 123–141.
- Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P. (1996) Soil structure degradation and mellowing of compacted soils by saline-sodic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 583-588.
- Baumgart, Th., Horn, R. (1991) Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil Till. Res.* 19: 203-213.
- Bradford, J.M. (1986) Penetrability. Pages 463-478 in A. Klute, ed. *Methods of Soil Analysis*, 2nd ed. Part I. ASA, Madison, WI.
- Brewer, R. (1964) *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. Willey, New York, 470 pp.
- Canarache, A. (1990) Penetr: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil and Tillage Research* 16, 51–70.
- Candemir, F., Gülser, C. (2011) Effects of different agricultural wastes on some soil quality indexes at clay and loamy sand fields. *Commun.in Soil Science and Plant Anal.* 42(1), 13-28.
- Carter, M.R., Johnston, H.W. (1989) Association of soil macroporosity and relative saturation with root rot severity of spring cereals. *Plant & Soil*, 120, 149-152.
- Castrignanö, A., M. Maiorana, F. Fornaro, N. Lopez (2002) 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a drum wheat field in southern Italy. *Soil & Till. Res.* 65:95-108.



- Day, P. R. (1965) Particle fractionation and particle size analysis. In *Methods of soils analysis*, part I, ed. C. A. Black, 545–567. Madison, Wisc.: ASA.
- Demir Z., Gülser, C. (2015) Effects of rice husk compost application on soil quality parameters in greenhouse conditions. *Eurasian Journal of Soil Science*, 4(3):185-190.
- Demiralay, I. (1993) Toprak Fiziksel Analizleri. Ataturk Universitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No. 143. Erzurum (in Turkish)
- Dexter, A.R. (2004) Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.
- Gonçalves, R.A.B., Gloaguen, T.V., Folegatti, M.V., Libardi, P.L., Lucas, Y., Montes, C.R. (2010) Pore size distribution in soils irrigated with sodic water and wastewater. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(3), 701-707.
- Gülser, C. (2006) Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma* 131:33–44.
- Gülser, C., Z. Demir, S. İç (2010) Changes in some soil properties at different incubation periods after tobacco waste application. *Journal of Environmental Biology*, 31:671-674.
- Gupta, S.C., Dowdy, R.H., Larson, W.E. (1977) Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Science Society America Journal* 41: 601-605.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K. (2005) Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Till. Res.* 82:121-145.
- Haynes, R.J., Naidu, R. (1998) Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 123–137
- Kacar, B. (1994) Chemical analysis of plant and soil III. Soil analysis. Ankara, Turkey: Ankara University, Agricultural Faculty Publications.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. (1986) Aggregate stability and size distribution. Pages 425-442 in A. Klute, ed. *Methods of soil analysis*, 2nd ed. Part I. ASA, Madison, Wisconsin.
- Khaleel, R., Reddy, K.R., Overcash, M.R. (1981) Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality* 10: 133-141.
- Kushwaha, C.P., Tripathi, S.K., Singh, K.P. (2001) Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem. *Appl. Soil Ecol.* 16, 229–241.
- Matsi, T., Lithourgidis, A.S., Gagianas, A.A. (2003) Effects of injected liquid cattle manure on growth and yield of winter wheat and soil characteristics. *Agronomy Journal* 95(3): 592-596.
- O’Sullivan, M.F., Diskon, J.W., Campell, D.J. (1987) Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *J. Soil Sci.* 38, 137-148.
- Parkin, T. B., J. W. Doran, E. Franco-Vizcaino (1996) Field and laboratory tests of soil respiration. In *Methods for assessing soil quality (Special Publication 49)*, ed. J. W. Doran and A. J. Jones, 231–246. Madison, Wisc.: SSSA.
- Soane, B.D. (1990) The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil & Till. Res.* 16: 179-201.
- Tüzüner, A. (1990) Soil and water analysis laboratory manual. Ministry of Agriculture, Forestry and Rural Affairs, General Directorate of Rural Services, Ankara, Turkey. (in Turkish)
- Usovics, B., Lipiec, J. (2009) Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity*, 6:263-271.



УДК 631.48+551.243

КАТЕНАРНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОЧВ И ПОРОД МАКРОСКЛОНА СЕВЕРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ КЛИНСКО-ДМИТРОВСКОЙ ГРЯДЫ И ВЕРХНЕВОЛЖСКОЙ НИЗИНЫ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ

Русаков А.В.¹, Попов А.И.¹, Позднякова А.Д.².

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
spp-06@mail.ru

²Дмитровский филиал ГНУ Всероссийский НИИ сельскохозяйственного
использования мелиорированных земель, г. Дмитров, Россия
antdanpozd@gmail.com

CATENARY DIFFERENTIATION OF SOILS AND SEDIMENTS OF THE MACROSCLOPE OF THE
NORTHERN EXPOSITION OF THE KLIN-DMITROV RIDGE AND THE UPPER VOLGA LOWLAND AND
PALEOGEOGRAPHY OF SEDIMENTATION DURING THE LATE PLEISTOCENE

Rusakov A.V.¹, Popov A.I.¹, Pozdnyzkova A.D.²

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

²Dmitrovsky Branch of the State Scientific Institution All-Russian Research Institute of Agricultural Use of
Reclaimed Lands of the Russian Academy of Agricultural Sciences

Annotation: Based on the catenary differentiation of the soil and the soil cover of the Klin-Dmitrov Ridge and the Upper Volga Lowland, lake sedimentogenesis of sandy, sandy and sandy loamy-clayey homogeneous and two-membered sediments was established on the surfaces of the conjugate levels with absolute marks of 130–180 m, which accumulated at the final stages of the late Pleistocene.

Введение

Изучению геоморфолого-литологического строения террасированной поверхности макросклона северной экспозиции Клинско-Дмитровской гряды гряды, отличающейся контрастностью, разновозрастностью почвообразующих пород (ПОП) проблематичного генезиса (в том числе и двучленов), не уделялось достаточного внимания. Мы полагаем, что морфолого-генетический анализ и свойства голоценовых почв, развитых на этих породах, занимающих сопряженные высотные уровни рельефа, может пролить свет на историю формирования ландшафтов территории в позднем неоплейстоцене. В пределах катены, пересекающей Клинско-Дмитровскую гряду (являвшейся южным порогом стока поздневалдайских подпрудных озер (ППО) и сопредельную поверхность Верхне-Волжской низины, выявлено наличие сопряженных ярусов рельефа, отделенных друг от друга четко выраженными уступами (рис. 1).

Объекты

Были детально исследованы 12 разрезов пахотных почв, позволивших выявить разнообразие, генетические особенности и пространственную дифференциацию почвообразующих и подстилающих пород в пределах выделенных ярусов. Антропогенно-преобразованные почвы отличаются большим разнообразием, среди которых на уровне типов выделены торфоземы агроминеральные, агродерново-подзолистые почвы, агроземы светлые и текстурно-дифференцированные, а также агростратоземы гумусовые и агроабраземы.



Результаты и обсуждение

Выявлена четкая катенарная дифференциация ПОП: двучленные отложения, представленные в пределах II яруса (а.о. 130–140(145) м) озерно-ледниковыми супесями, подстилаемыми озерно-ледниковыми, либо бескарбонатными пылеватыми глинами (рис. 1). На основной поверхности III яруса (а.о. 145–160 м) развиты бескарбонатные пылеватые суглинки, перекрытые в краевой части (уступ ко II ярусу) озерно-ледниковыми супесями. Поверхность IV яруса (а.о. 165–170 м) сложена бескарбонатными пылеватыми суглинками, перекрытыми маломощным чехлом озерно-ледниковых супесей. ПОП V и VI ярусов (а.о. 175–230 м) представлены бескарбонатными пылеватыми суглинками, в том числе с участием слоистых суглинков (V ярус, а.о. 175–230 м).



Рис.1. Морфологическое строение и свойства почв катены, важные для палеогеографической реконструкции ландшафтов Клинско-Дмитровской гряды. Условные обозначения: Суглинки: 1 – бескарбонатные пылеватые; 2 – бескарбонатные пылеватые слоистые; 3 – крупнопылеватопесчаные; 4 – бескарбонатные пылеватые глины. Супеси: 5 – крупнопылеватопесчаные; 6 – песчано-крупнопылеватые; 7 – глины. Эвтрофные торфа: 8 – гипновые; 9 – древесно-осоковые; 10 – осоково-древесные. 11 – древние углефицированные остатки растительности; 12 – мелкие валуны и галька; 13 – номера почвенных разрезов; 14 – а.о. поверхности, м.

Выявлена четкая катенная дифференциация ПОП: двучленные отложения, представленные в пределах II яруса (а.о. 130–140(145) м) озерно-ледниковыми супесями, подстилаемыми озерно-ледниковыми, либо бескарбонатными пылеватыми глинами (рис. 1). На основной поверхности III яруса (а.о. 145–160 м) развиты бескарбонатные пылеватые суглинки, перекрытые в краевой части (уступ ко II ярусу) озерно-ледниковыми супесями. Поверхность IV яруса (а.о. 165–170 м) сложена бескарбонатными пылеватыми суглинками, перекрытыми маломощным чехлом озерно-ледниковых супесей. ПОП V и VI ярусов (а.о. 175–230 м) представлены бескарбонатными пылеватыми суглинками, в том числе с участием слоистых суглинков (V ярус, а.о. 175–230 м).

Для выявления закономерностей пространственной дифференциации осадконакопления в пределах обследованного участка Клинско-Дмитровской гряды, был проведен двухфакторный дисперсионный анализ содержания гранулометрических фракций исследованных почв агрокатены в зависимости от 1) гипсометрического уровня (а.о, м), к которому приурочен разрез (фактор А) и 2) от состава породы (супеси, суглинки и глины – толщи двучлена или однородная порода) – фактор Б. Методами вариационной статистики были проанализированы фракции песка (1,00–0,05 мм) и крупной пыли (0,05–0,01 мм). Объекты были ранжированы на группы. Первая группа включала все разрезы, содержащие



супесчаные, суглинистые и глинистые толщи (условно – «почвообразующие породы») в одном профиле. Таких разрезов оказалось три, которые приурочены ко II ярусу. Фактор А существенен для всего массива. Во всех разрезах выявилась четкая закономерность: чем они были гипсометрически выше расположены, тем в составе супесчаной, суглинистой и глинистой частей профиля достоверно уменьшалось содержание песка и увеличивалось содержание лессовидной фракции (рис. 2а,б), причем в суглинках и особенно глинах эта закономерность проявляется наиболее ярко. Сказанное свидетельствует в пользу принадлежности глин к единому парагенетическому ряду субаквального седиментогенеза, в котором озерно-ледниковые глины, существенно различающиеся по содержанию песка, в латеральном протяжении сменяются бескарбонатными лессовидными глинами. То же самое можно сказать и о суглинках, которые в разрезах в виде прослоев отделяют супесчаную и глинистую толщи почвенных разрезов. Взаимодействие факторов А и Б для рассматриваемых разрезов было существенно, т. е. содержание как песка, так и крупной пыли определялось гипсометрическим уровнем поверхности, на которой была сформирована почва, а также классом гранулометрического состава каждой группы «породы».

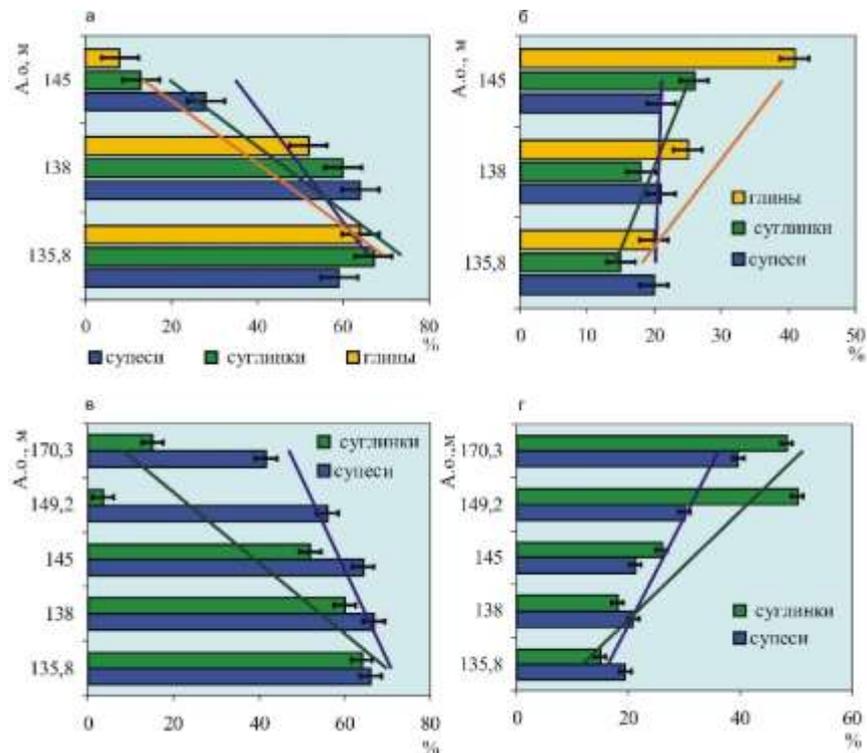


Рис.2. Содержание гранулометрических фракций в исследованных разрезах агрокатены (Клинско-Дмитровская гряда). Фракции: а – песка, б – крупной пыли в почвах, сформированных на супесях, суглинках и глинах; в – песка, г – крупной пыли в почвах, развитых на супесях и суглинках.

Второй ряд агропочв представлен пятью разрезами, сформированными в пределах II–IV ярусов (рис. 2в,г), в профиле которых присутствуют как супесчаные, так и суглинистые толщи. Влияние фактора А оказалось также существенным для всего массива данных, т.е. уменьшение содержания песка как в супесчаных, так и в суглинистых толщах разрезов с увеличением а. о. поверхности, к которым приурочены почвы, было достоверным. На общем фоне были выявлены следующие закономерности: 1) отсутствовали различия в содержании фракций песка в супесчаной составляющей профилей почв в пределах II яруса; 2) уменьшалось содержание песка в почвах III и наиболее заметное снижение этой фракции – в



почвах IV яруса (рис. 2в). Наконец, были выявлены взаимосвязи между а.о. поверхности и содержанием песчаной и лессовидной фракций в почвах, развитых на суглинистых отложениях. Между содержанием этих гранулометрических фракций в суглинистых толщах почв агрограда установлена тесная существенная криволинейная связь.

Для выявления специфики ПП, закономерностей площадной дифференциации почвенно-осадочных толщ в пределах II–VI ярусов, применялись полевые электрофизические методы, позволяющие, в частности, решать определенный круг почвенно-генетических задач (Поздняков, 2001; 2009). Был применен метод горизонтального электрического профилирования (ГЭП), что позволило в пределах каждого массива пахотных почв измерять электрическое сопротивление (ЭС) на глубину 0,3, 0,5 и 1,0 м. Площадь участков составляла 40–60 га; количество точек опробования регулярным шагом в каждом массиве – от 60 до 200 измерений. Каждая точка измерения на местности сопровождалась привязкой с помощью спутникового навигатора (GPS). Проведенные измерения ЭС методом ГЭП с расстоянием между электродами 0,3 м позволили оценить сопротивление агропочв на глубину пахотного горизонта по всему массиву. В пределах II яруса рельефа величины ЭС в основном составляли 200–300 Ом.м с увеличением в локальных участках до 300–400 Ом.м (рис. 3). Измерения по методу ГЭП на эту же глубину в пахотном массиве в пределах III яруса рельефа показало резкое уменьшение параметра R до величин 100–150 и 50–150 Ом.м по сравнению со II ярусом, что показывает утяжеление гранулометрического состава супесчаной толщи двучленов и уменьшение мощности самого двучленного наноса. Распределение величин ЭС в пределах IV яруса носит более сложный характер (рис. 3): сопротивление варьирует от 200–300 до 150–200 Ом.м. В районе тылового шва выявлены локальные зоны с увеличением сопротивления до 300–500 Ом.м, что соответствует участкам, сложенным облегченным (супесчаным) наносом и/или наличием пылеватых суглинков с включением галечниковатого материала в верхних горизонтах почв. Величины ЭС в пахотном массиве V яруса укладываются в интервал от 50–150 до 150–200 Ом.м, что указывает на наличие сплошного чехла пылеватых суглинков. Низкие величины сопротивления в пределах пахотного массива VI яруса характерны для почв, развитых на однородных пылеватых суглинистых отложениях.

В целом, картина распределения величин ЭС по всем ярусам, при расстояниях электродов 0,3 и 0,5 м, получилась довольно схожая (рис. 3). Обращает внимание картина дифференциации величин ЭС в пределах V яруса (а.о. 175–190 м), где на общем фоне 50–150 Ом.м выделяются узкие вытянутые спиралевидные и меридионально вытянутые «полосы» (рис. 6), имеющие заметно большее сопротивление, что диагностирует наличие облегченных по гранулометрическому составу суглинистых наносов, вероятнее всего – слоистых пылеватых суглинков с включением мелкого окатанного материала.

При рассмотрении результатов измерений по методу ГЭП с расстоянием между электродами 1,0 м, меньшие (200–400 Ом.м) величины ЭС в пределах II яруса свидетельствует о близком залегании к поверхности (~1,0 м) нижней части двучленов – озерно-ледниковых глин, что резко снижало сопротивление суммарной метровой толщи. Спорадические пятна, которые характеризовались резким увеличением сопротивления до 600–800 Ом.м, указывают на локальное распространение мощных (глубже 1,0 м) супесчано-песчаных зон и свидетельствует в пользу относительно небольшой мощности озерно-ледниковых глин.

Выводы

Таким образом, фактический материал по свойствам и закономерностям пространственной дифференциации почв в пределах агрокатены, позволяет определенно установить озерный седиментогенез песчаных, супесчаных и суглинисто-глинистых



однородных и двучленных отложений на поверхностях сопряженных ярусов с а.о. 130–180 м. Накопление толщи отложений происходили во время существования единой системы ППО (изученная территория являлась юго-восточным заливом Тверского озера, сообщаемого с системой Верхне-Волжских озер) в максимальную стадию Валдайского криохрона (18–20 тыс. л.н.). Склон северной экспозиции Клинско-Дмитровской гряды служил бортом и своеобразной прибойной зоной приледниковых озер. Слоистые бескарбонатные лессовидные суглинки, происхождение которых обязано аквальному седиментогенезу (Спиридонов, 1949; Соколов, 1954; Чижиков, 1968; Новский, 1975; Базилевская, 1989), спорадически встречающиеся в пределах V яруса, являются прямыми маркерами максимального (до а.о. 180 м) уреза поздневалдайского озера.

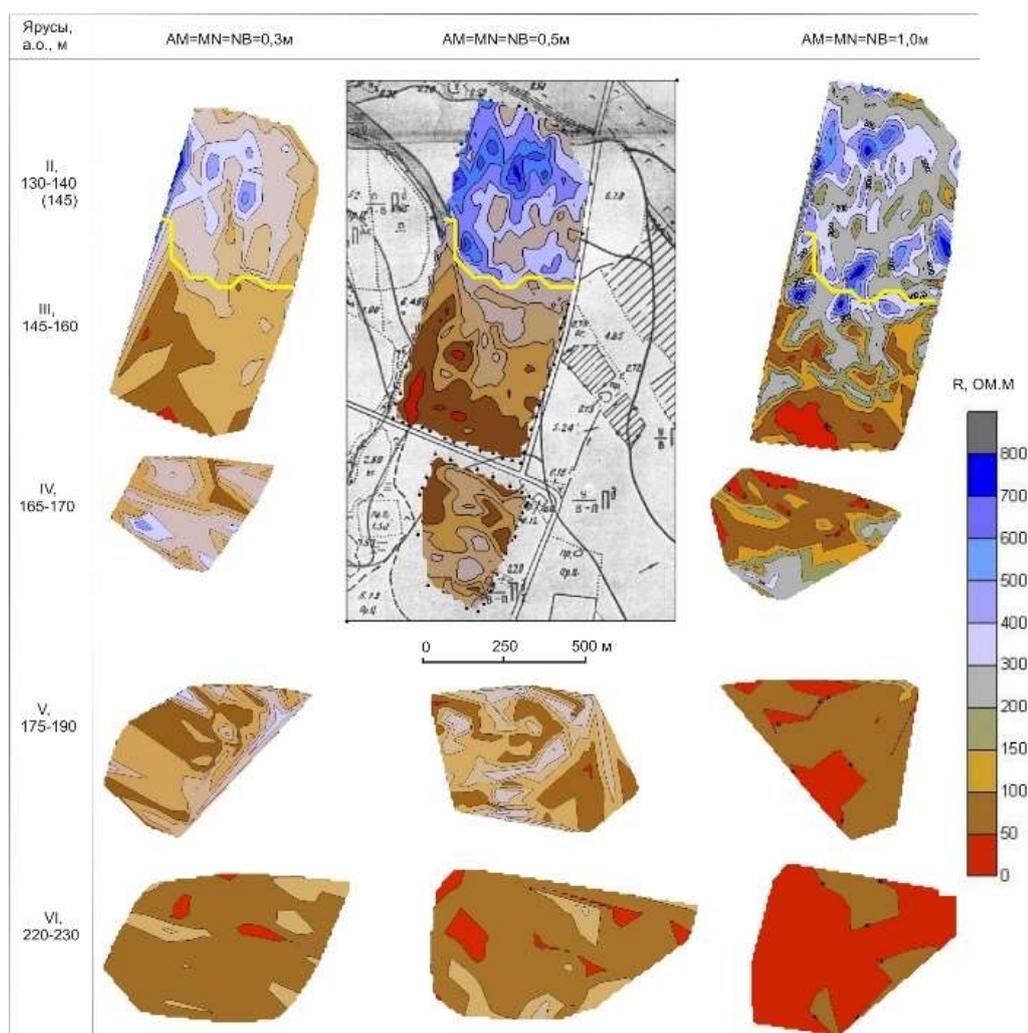


Рис.3. Распределение величин ЭС ГЭП агропочв и пород ключевых участков в пределах сопряженных ярусов Клинско-Дмитровской гряды.

Деграция озерного бассейна в позднеледниковье происходила поэтапно: периоды стабилизации маркированы хорошо выраженными уступами (выделяется 5 уступов, большей частью коррелирующих с региональными для бассейна Верхневолжья) и донными поверхностями (выровненными площадками). Последние сложены гетерохронными двучленными наносами (более молодые отложения занимают низкие гипсометрические поверхности), отражающими динамичный характер спуска приледниковых вод. Кроющая



часть двучленов представлена озерно-ледниковыми песками и супесями, подстилаемыми (от IV ко II ярусу) бескарбонатными лессовидными суглинками и глинами и ближе к древнеозерному расширению долины р. Яхрома – озерно-ледниковыми глинами. Аквальный характер седиментогенеза на сопряженных поверхностях рельефа в условиях ППО подтверждается достоверным уменьшением содержания песчаных фракций в супесчаной, суглинистой и глинистой частях почвенных профилей и/или их фрагментов с ростом гипсометрических отметок, к которым приурочены разрезы. Подобная дифференциация почвообразующих и подстилающих пород по содержанию грубодисперсных фракций возможна в случае быстрого спуска озер, в результате чего песчаный материал, первоначально отлагавшийся на поверхности высоких уровней, был переотложен на глинистые наносы низких ярусов рельефа, что и зафиксировано в морфологическом строении профиля и свойствах исследованных почв.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РНФ (проект 17-17-01289) и РФФИ (проект 17-04-01221).

Литература

- Базилевская Л.И. (1989) Микростроение лессовидных отложений Ярославского Поволжья. *Бюллетень Почв. ин-та им. В.В. Докучаева* **51**, 82-83.
- Новский В.А. (1975). Плейстоцен Ярославского Поволжья. М.: Наука, 236 с.
- Поздняков А.И. (2001). Полевая электрофизика почв. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 187 с.
- Поздняков А.И. (2009). Электрофизические методы исследования почв (методическое пособие). М., 39 с.
- Соколов Н.Н. (1954). Особенности рельефа Московской области. *Сборник работ Центрального музея почвоведения имени В.В. Докучаева. М.-Л., Изд-во АН СССР, 160-230.*
- Спиридонов А.И. (1949). Из истории развития рельефа Подмосковья. *Рельеф Москвы и Подмосковья. М.: Изд-во географ. лит-ры, 135-155.*
- Чижиков П.Н. (1968). Карта почвообразующих пород Европейской части СССР. Пояснительный текст. М., 38 с.



УДК 631.4

ФОРМА И ОРИЕНТАЦИЯ ПОЧВЕННЫХ ПОР. В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А.Д. ВОРОНИНА О СТРУКТУРЕ И ПОРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПОЧВЫ

Скворцова Е.Б.

ФГБНУ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва, Российская Федерация
eskvora@mail.ru

FORM AND ORIENTATION OF SOIL PORES AS A DEVELOPMENT OF A.D. VORONIN IDEAS ABOUT
STRUCTURE AND PORES SPACE OF SOIL

Skvortsova E.B.

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

Annotation: Automatic diagnostics of the aggregate soil structure was carried out according to the shape, orientation and linear dimensions of the pores in two-dimensional sections, based on the morphometric study of pores in vertical soil sections of the main genetic types of loamy soils in the European territory of Russia. 75-90% coincidence of machine and visual expert assessments of the structural state of the soil was revealed.

Введение

Наряду с представлением о почвенной структуре как о совокупности агрегатов различной формы и размера, все большее признание получает широкое определение, разработанное А.Д. Ворониным, согласно которому под почвенной структурой понимают физическое строение вещества почвы, обусловленное размерами, формой, количественным соотношением, характером взаимосвязи и расположением элементарных почвенных частиц и состоящих из них агрегатов (Воронин, 1984, стр. 14). Предложенное А.Д. Ворониным определение подчеркивает пространственно-геометрический характер почвенной структуры. Дисперсное тело занимает определенный объем и от того, каким образом структурные элементы заполняют этот объем, зависят многие параметры системы. Одним из основных пространственно-геометрических показателей почвенной структуры в широком смысле является морфологическое строение почвенных пор и трещин. В агрегированной почве строение пустотного пространства отражает форму и расположение структурных отдельностей, в почве с массивным сложением – служит самостоятельным геометрическим показателем почвенной структуры.

К числу прямых индикаторов структурного состояния почвы относятся форма и ориентация почвенных пор. Так, изометричные ажурные поры упаковки характерны для почвы с комковатой структурой. Линейно вытянутые трещиновидные поры разделяют угловато-призматические агрегаты. В случае плитчатой или пластинчатой структуры трещиновидные поры имеют преимущественно горизонтальную ориентировку, при столбчатой структуре - вертикальную. Округлые пузырьковые поры в неструктурной почвенной массе диагностируют специфическую везикулярную структуру почвенных корок.

В настоящее время актуальна диагностика физического строения (структуры) почвы на основе количественных показателей формы и ориентации пор в почвенных образцах ненарушенного сложения. При этом картину порового пространства рассматривают с двух позиций: 1 – непосредственно как систему сообщающихся пор (исследование трехмерных томографических изображений) и 2 – как совокупность дискретных срезов пор, отражающую эту систему (исследование почвенных шлифов или двумерных срезов через томографические изображения).



В представленной работе обсуждаются пути и методы количественной характеристики формы и ориентации пор в двумерных срезах. Исследована возможность автоматической морфометрической диагностики агрегатной почвенной структуры по этим показателям.

Объекты и методы

Исследовали поры $0,1 < d < 2,0$ мм в прозрачных шлифах вертикальной ориентации из целинных и пахотных суглинистых почв европейской территории России: дерново-подзолистых, серых лесных, черноземов. Морфометрический анализ пор проводили с увеличением $15\times$ в полях зрения 20×20 мм с использованием программ анализа изображения Megiscan-2 и Image-Pro. Измеряли – площадь (S), периметр (P), поперечный (D) и продольный (L) габариты всех пор, видимых в поле зрения. В качестве показателя ориентации пор использовали угол отклонения длинной оси поры от вертикали (градусы). Для формализованной обработки полученных морфометрических данных использовали методы кластерного анализа и автоматической численной классификации объектов по ряду количественных признаков (Рожков, 1989).

Результаты и обсуждение

Для характеристики формы плоских дискретных срезов пор применяют различные показатели: S/P^2 , P^2/S , $P^2/4\pi S$, $4\pi S/P$, $4\pi S/P^2$, D/L , L/D и др. Одна группа этих показателей опирается на соотношение площади (S) и периметра (P), вторая представлена соотношением продольных (L) и поперечных (D) габаритов пор. Каждый из перечисленных показателей имеет ограниченное применение: соотношение габаритов не учитывает изрезанности стенок

пор, соотношение площади и периметра не различает изометричные и вытянутые срезы (рис. 1, Скворцова, Морозов, 1993). Для более полной характеристики формы пор в двумерных срезах необходимо учитывать оба показателя.

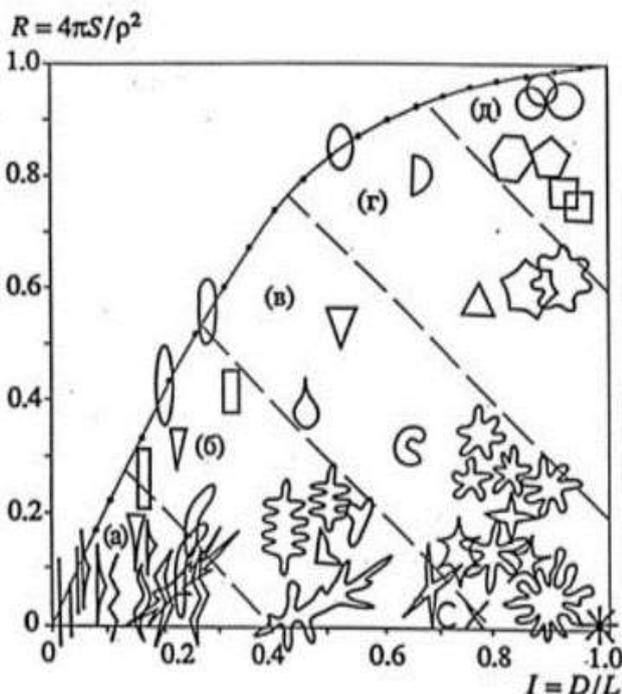


Рис. 1. Модельные двумерные изображения пор в координатах I, R . (Скворцова, Морозов, 1993)

В качестве одного из возможных вариантов единого фактора формы можно использовать полусумму показателей округлости $R=4\pi S/P^2$ и изометричности $I=D/L$. В этом случае фактор формы пор в плоских срезах определяется по формуле $F=(4\pi S/P^2+D/L)/2$, где F – обобщенный фактор формы, S – площадь, P – периметр, D – поперечный, L – продольный габариты срезов пор (Скворцова, Морозов, 1993). Как и его составляющие, обобщенный фактор формы изменяется от $F=1$ для окружности до

$F \ll 1$ для трещиновидных контуров. В то же время изометричные поры, даже с очень изрезанными границами, не попадают в интервал с низкими значениями F . Для этих пор величина фактора формы складывается из близких к нулю значений округлости и близких к единице значений изометричности, таким образом, показатель F для них приближается к 0,5.



Обобщенный фактор формы был опробован при анализе тонких почвенных макропор ($d=0,1-2\text{мм}$), отличающихся большим разнообразием формы. На рисунке 1 пунктирными линиями показаны границы, разделяющие поры на пять классов по величине фактора формы: $0 < F \leq 0,2$; $0,2 < F \leq 0,4$; $0,4 < F \leq 0,6$; $0,6 < F \leq 0,8$; $0,8 < F \leq 1,0$ (классы а, б, в, г, д). В класс "а" попадают трещиновидные поры, в класс "д" - поры с округлыми и близкими к ним изометричными срезам. Средние классы более неоднородны по составу. Тем не менее, распределения пор по этим пяти классам отражают основные черты строения порового пространства почв: трещиноватость, наличие и содержание ажурных пор упаковки комковатых агрегатов, наличие и содержание гладкостенных каналов и слабоизрезанных пор, защемленных в неагрегированной почвенной массе.

С помощью обобщенного фактора формы F было проанализировано около 800 вертикальных шлифов из основных типов суглинистых почв европейской территории России. На основе распределений пор по величине F , а также с учетом их ориентации и продольных габаритов с помощью кластерного анализа в этих шлифах было выделено 8 типов строения порового пространства с уровнем сходства внутри типов не ниже 70% (рис. 2). Каждый из типов совпадает с одной из следующих почвенных структур в шлифах: I – массивной (не разделенной на агрегаты), II – трещиновато-массивной, III – массивно-трещиноватой, IV – комковатой, V – комковато-микроблоковой (зернистой), VI – угловато-изометрично-блоковой (ореховатой), VII – пластинчатой, VIII – массивно-плитчатой. Указанные восемь типов вычлняются из более крупных групп с менее высоким уровнем внутреннего сходства.

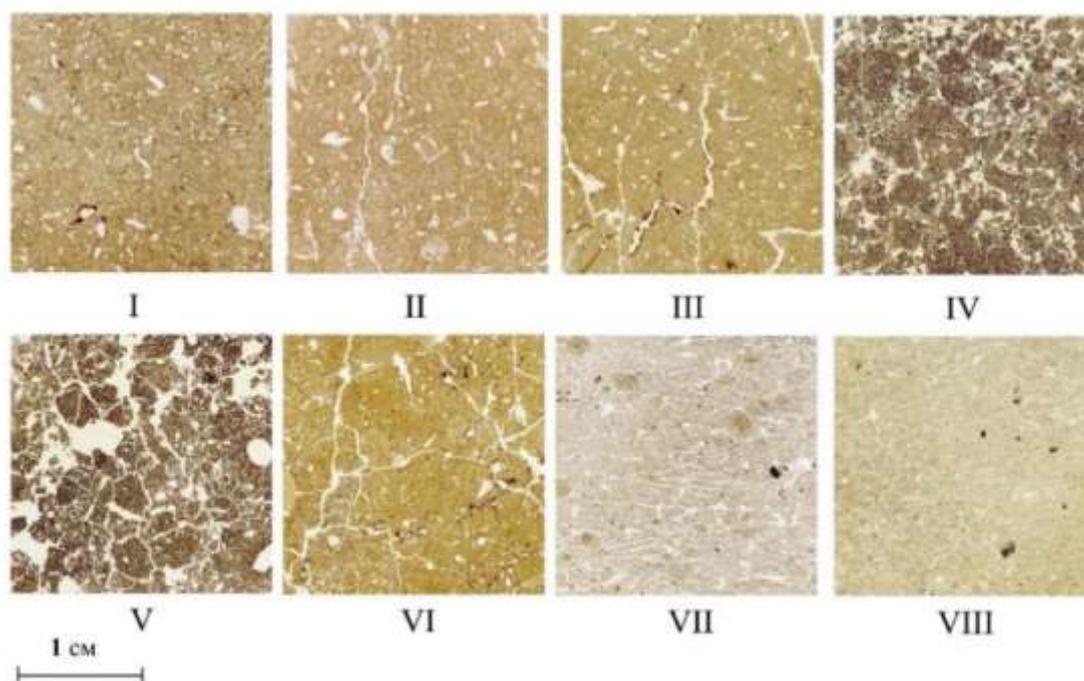


Рис. 2. Типы макропорового пространства в шлифах из различных горизонтов суглинистых почв европейской территории России (Skvortsova, Kalinina, 2004).

С помощью дискриминантного анализа была создана программа автоматической морфометрической диагностики почвенной структуры на основе строения порового пространства почвы. По этой программе исследуемый шлиф, представленный параметрами строения макропор, автоматически относится к наиболее близкому типу почвенной структуры. Для оценки качества разработанной системы было проведено сравнение



результатов автоматизированной диагностики строения порового пространства в шлифах и его экспертной визуальной оценки. В среднем при объеме выборки в 10 шлифов было отмечено более чем 75% совпадение оценок. Причем в четырех наиболее специфичных типах порового пространства при массивной, комковатой, пластинчатой и массивно-плитчатой структуре совпадение визуальных и автоматических оценок равно или превышает 90%. Менее выражена сходимость результатов при трещиновато-массивной, комковато-микроблоковой (зернистой) и угловато-изометрично-блоковой (ореховатой) структурах. Однако в большинстве случаев разброс оценок не выходит за рамки пограничных типов (Скворцова и др., 2015).

Выводы

Форма и ориентация почвенных пор относятся к числу прямых индикаторов структурного состояния почвы. В настоящее время сохраняется актуальность количественного изучения геометрии почвенных пор в их дискретных двумерных срезах. Автоматическая диагностика агрегатной почвенной структуры по показателям формы, ориентации и линейных габаритов пор в двумерных срезах показала 75-90% совпадение машинных и визуальных экспертных оценок. Достоверность предложенной диагностики определяется комплексным использованием основных геометрических показателей (формы, ориентации, размера) и объективным отбором измеряемых пор (методом сплошного перечета).

Благодарности: 1). Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-04-01056) и Президиума РАН (грант на проведение фундаментальных научных исследований в 2019 г.).

2). Работа выполнена с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Литература

1. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984, - 204 с.
2. Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы. //Почвоведение. 1993. N 6. С. 49-56.
3. Скворцова Е.Б. Микроморфометрия порового пространства почвы и диагностика почвенной структуры. //Почвоведение, 1994, № 11, С. 42-49.
4. Рожков В.А. Почвенная информатика. – М.: Агропромиздат, 1989, - 200 с.
5. Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Морозов Д.Р. //Использование многомерных статистических методов для классификации и диагностики строения порового пространства почвы в микроморфологических шлифах. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 79. С. 36-52.
6. Skvortsova E.B., Kalinina N.V. Micromorphometric types of the pore space in virgin and plowed loamy soils//Eurasian Soil Science. 2004. T. 37. № 9. С. 980-991.



УДК 631.4

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А.Д. ВОРОНИНА В ТЕРМОДИНАМИКЕ ПОЧВЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Смагин А.В.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
Институт лесоведения РАН, Московская обл., п. Успенское, Российская Федерация
Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
smagin@list.ru

ELABORATION OF A.D. VORONIN IDEAS IN THERMODYNAMICS OF SOIL PHYSICAL SYSTEMS

Smagin A.V.

Faculty of Soil Science Dept. of Moscow state University, Moscow, Russian Federation
Institute of Forestry RAS, Moscow region, Uspenskoe, Russian Federation
Peoples ' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

Annotation: The review considers the main directions and achievements of soil physical systems thermodynamics in University school of prof. A.D.Voronin. New instrumental methods of soil physics, empirical and fundamental models of basic thermodynamic characteristics and their use in computer modeling of energy and mass exchange, physically-based methodology for assessing the characteristic states of the soil physical system by water-retention curves are presented. Special attention is paid to the study of factors that control the interfacial interaction of solid, liquid and gas phases in connection with the dynamics of soil physical systems and the problem of soil construction.

Наиболее значимым вкладом заведующего кафедрой физики и мелиорации почв, декана ф-та почвоведения МГУ, профессора А.Д. Воронина в становление и развитие отечественной гидрофизики является термодинамическая концепция физического состояния почв как результата взаимодействия их твердой, жидкой и газовой фаз с базовым количественным показателем таких взаимодействий в виде основной гидрофизической характеристики (ОГХ). В ней удалось впервые совместить представления западной школы о континуальности влаги и ее энергетического состояния с классическим, преимущественно отечественным учением о почвенно-гидрологических константах (ПГК), предполагающим возникновение дискретных («предельно-равновесных» по [6]) состояний почвенной физической системы при плавном, непрерывном изменении содержания влаги. Дальнейшее развитие концепции на современном этапе происходило по ряду направлений, заложенных основополагающими работами А.Д. Воронина [4-6], и ниже рассматриваются наиболее весомые, с точки зрения автора, достижения в данной области исследований.

-Инструментальные методы исследования ОГХ, других равновесных термодинамических характеристик и показателей и их фундаментальное обеспечение. Этот важнейший для обеспечения научных исследований раздел развивался на кафедре физики и мелиорации почв МГУ в двух взаимодополняющих направлениях: а) приобретение, освоение и адаптация к задачам почвенной термодинамики передового иностранного оборудования [22, 27]; б) разработка собственных оригинальных методов исследования и их фундаментальной базы [8, 12, 14, 15, 20, 22, 32, 44, 48-51, 53, 62]. По второму направлению к серьезным достижениям кафедры можно отнести методы оценки ОГХ, функции ненасыщенной гидравлической проводимости, электропроводности и осмотического потенциала поровых растворов, диффузивности газов от влажности, на базе теории и моделей равновесного центрифугирования, динамические методы оценки изотерм сорбции паров воды и газов на базе теории хроматографии с использованием газовых хроматографов, ИФК-



газоанализаторов и программируемых гидротермических датчиков DS1923 «гигрохрон» для регистрации выходных кривых газов и паров, новый термодесорбционный метод определения полного потенциала влаги и дисперсности (эффективной удельной поверхности) на базе фундаментальной термодинамической зависимости активности влаги от температуры и положений потенциальной теории Поляни, модификацию криоскопического метода определения полного потенциала влаги синхронно с температуропроводностью в циклах охлаждения/нагрева почвы с автоматической регистрацией температуры во времени программируемыми датчиками DS1921-1923 «термохрон», «гигрохрон», распределенный дизелькометрический метод осредненного мониторинга влажности и структурного состояния культурного слоя земельных участков, модификации методов ВЭЗ и СЭП на базе полифункционального прибора Landmapper оригинальной конструкции и ряд других разработок.

- *Модели базовых термодинамических функций* и их использование для описания физического состояния почв и компьютерного моделирования его динамики в процессах энергомассообмена с окружающей средой. В данном комплексном направлении главные достижения были связаны: а) с инициативой нового заведующего кафедрой проф. Е.В. Шеина и ряда других специалистов по приобретению и внедрению в научный и учебно-образовательный процессы современных компьютерных софтов для моделирования энергомассообмена в распределенных физических системах [1, 17-19, 25, 28], что позволило приблизить термодинамические исследования на кафедре к передовому мировому уровню и эффективно решать актуальные практические задачи физики и мелиорации почв, включая проектирование специальных почвенных конструкций [17, 19, 39, 61]; б) с разработкой эмпирических моделей базовых термодинамических гидрофизических и теплофизических характеристик и их гистерезиса, использующих современные методы статистического и геостатистического анализа, педотрансферных функций, нейронных сетей, опорных векторов и др. [22, 26, 30, 36, 37, 40, 41] в качестве информационного обеспечения численного компьютерного моделирования энергомассообмена, включая исследования на ландшафтном уровне (2D/3D); в) с разработкой фундаментальных моделей ОГХ, изотерм сорбции паров воды (полного потенциала), осмотического потенциала, межфазных взаимодействий газообразных веществ с твердой и жидкой фазами почвенной физической системы [44, 47, 50, 65, 66]. В последнем разделе направления выделим фундаментальную ионно-электростатическую модель расклинивающего давления для описания некапиллярной области ОГХ с доминированием поверхностных сил и механизмов водоудерживающей способности, разработанную на ее основе альтернативную стандартной теории БЭТ методологию оценки дисперсности (эффективной удельной поверхности) по наклону ОГХ, а также фундаментальную концепцию конкурентных межфазных взаимодействий и динамики дисперсности при формировании водоудерживающей способности почв, впервые на количественном уровне выявившую влияние состава и концентрации жидкой фазы на ОГХ через агрегативную устойчивость частиц коллоидного комплекса почвы и динамику ее дисперсности [44, 50, 55, 58, 65, 66].

- *Физически-обоснованная методология анализа ОГХ* и сопутствующих термодинамических характеристик для выявления дискретных «предельно-равновесных» состояний почвенной физической системы, маркирующих границы действия тех или иных физических сил, механизмов и связанных с ними категорий почвенной влаги. Предложенный А.Д. Ворониным [4-6] метод «секущих» по существу был эмпирическим, и не мог по этой причине претендовать на универсальность. В частности, он сильно завышал абсолютные значения критических потенциалов почвенно-энергетических констант для почв и грунтов



легкого гранулометрического состава. Функциональный дифференциальный анализ кривых ОГХ позволяет в капиллярной области (стандартная модель ван-Генухтена) выявить лишь одну сингулярную точку перегиба, с которой можно связать так называемую капиллярную влагоемкость, а в принятом в гидрофизике полулогарифмическом масштабе – экстремум (пик) на кривых дифференциальной влагоемкости, и, соответственно, доминирующий размер пор в структуре исследуемого капиллярно-пористого тела [19, 31]. По аналогии единственной сингулярной точке на кривых изотерм сорбции паров воды можно поставить в соответствие величину максимальной адсорбционной влагоемкости (МAB) по Воронину или сходную с ней величину так называемого «нерастворяющегося объема» (НО); эти показатели характеризуют долю прочносвязанной адсорбционными, хемосорбционными и химическими связями влаги в почве, которая не способна к перемещению и отличается по ряду свойств от обычной жидкой влаги, в частности неспособностью к гидратации и растворению веществ [44, 47]. Иной сингулярности на ОГХ нет, что затрудняет визуальный анализ искомым границ по кривым водоудерживания и порождает скептицизм у ряда приверженцев западной термодинамической школы в отношении целесообразности подобных исследований и в реальности почвенно-гидрологических констант как таковых вообще. Строгое физическое рассмотрение равновесия физических сил, контролирующих водоудерживающую способность в почвенной физической системе [16, 44, 50], убеждает в обратном, но приводит к выводу о подвижности границ между этими силами и между соответствующими категориями почвенной влаги (ПГК, почвенно-энергетическими константами по Воронину [6]). Так для состояния наименьшей влагоемкости (НВ), как границы между гравитационной и капиллярной влагой в почве, это будет равновесие между макрокапиллярными силами (капиллярные явления 1 рода), стремящимися удержать воду в порах и зависящими от дисперсности и структуры почвы, и силой тяжести, стремящейся эту воду из почвы удалить. Поэтому величина НВ будет определяться не только характеристиками твердой фазы и пористости, но и мощностью (высотой) стекающего единого водного тела и, соответственно, мощностью однородной почвенной толщи над ближайшим водоупором (уровнем грунтовых вод – УГВ) [57]. При коротком профиле, а в лабораторных условиях – в трубках небольшой (5-10 см) высоты НВ будет стремиться к полной влагоемкости (ПВ) или водовместимости по Качинскому. При значительном (5-10 м и более) удалении УГВ от поверхности почвы, величина НВ будет стремиться к максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ) или влажности разрыва капиллярной связи (ВРК). Именно такая величина в длительных полевых опытах А.А.Роде [13] получила название «истинная НВ», причем время установления равновесия, как показывает численное моделирование, здесь может затянуться на годы и даже десятилетия [17]. Вместо метода «секущих» для определения НВ в короткопрофильных почвах и почвенных конструкциях можно использовать высоту профиля, а в глубокопрофильных – высоту капиллярного поднятия, выражая их в см и откладывая на ОГХ по оси эквивалентного давления, выраженного в см.вд.ст. [44, 57].

Состояние ММВ (ВРК) как граница между макрокапиллярными и поверхностными силами и, соответственно, капиллярно-гравитационной и пленочной (рыхлосвязанной) влаги характеризуется динамичностью в зависимости от устойчивости равновесия между менисками и сольватными слоями (капиллярные явления 2 рода). Его экспериментальная оценка может осуществляться по экстремуму (пику) на кривых осмотической составляющей полного термодинамического потенциала как функции от влажности, чему в контексте пионерной работы [7] дано четкое физическое обоснование и разработана физико-статистическая модель этого явления с параметрами ММВ (ВРК) и НО [16, 63]. Величины (ММВ (ВРК)) маркируют подвижные границы между макрокапиллярными и



поверхностными силами (механизмами) водоудерживания, а НО (МAB) между прочносвязанной (адсорбированной, хемосорбированной, конституционной, кристаллогидратной) и рыхлосвязанной (пленочной) влагой в пределах двойного электрического слоя (ДЭС), и они могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от факторов, контролирующих ширину ДЭС и агрегативную устойчивость тонкодисперсных частиц, разделенных сольватными слоями, например, от температуры, состава (заряда ионов) и концентрации электролитов жидкой фазы [44, 50, 63]. В целом, строгое физическое рассмотрение представляет ПГК в виде спектра величин и позволяет проводить их определение по ОГХ в зависимости от внутренних факторов межфазных взаимодействий и внешних физических сил и полей.

- *Количественное исследование факторов, контролирующих взаимодействия твердой, жидкой и газовой фаз*, в связи с направленной динамикой почвенных физических систем. В исследованиях А.Д. Воронина приоритет здесь традиционно отдавался структурной организации твердофазной матрицы и соответствующим факторам дисперсности и структуры порового пространства. Это направление впоследствии активно развивалось на кафедре в работах профессоров П.Н.Березина [2, 3, 22], Е.В. Шеина [22, 25-27, 34, 41, 68], И.И. Судницына [33, 67], Л.О. Карпачевского и Т.А. Зубковой [22, 9], А.Б. Умаровой [23, 24, 69, 70] с учениками и сотрудниками на базе оригинальных подходов и методов, включая полевые 2D/3D исследования и стационарные лизиметрические опыты с выявлением транзитных зон и каналов (макропор) преимущественного транспорта влаги, лабораторное изучение сложного строения и анизотропии порового пространства методом 3D компьютерной томографии. К ним примыкают исследования характеристик дисперсности и микроструктуры методами седиментационной рентгенографии, лазерной дифрактометрии и сорбтометрии, цифровой гониометрии смачиваемости на границе раздела фаз [22, 27, 68], реологических, структурно-механических свойств и прочностных характеристик структурных связей в почвенных агрегатах [9, 10, 22, 34, 35, 46]. Отдельно выделим направление биогенной организации почвенной физической системы под влиянием аккумуляции и деструкции природных и синтетических органических веществ [11, 17-19, 21, 22, 38, 39, 52, 54, 56, 59, 60, 64]. В этих работах впервые выявлено ключевое влияние органического углерода гумуса и детрита на ОГХ почв разного генезиса и дисперсности и их общую (интегральную) энергию водоудерживания, значение качества природных органических веществ в формировании агрегатной структуры почвы с позиций их амфифильности, роли копролитов червей в динамике ОГХ, исследованы возможности оптимизации физического состояния почв синтетическими полимерными гидрогелями в связи с проблемой почвенного конструирования, предложены оригинальные математические модели почводинамики в связи с феноменом биогенной организации. Вместе с тем, факторы и характеристики не только твердой, но и двух других – жидкой и газовой фаз почвы, как оказалось, могут иметь существенное воздействие на термодинамическое состояние влаги и почвенной физической системы в целом. Это направление только начинает развиваться, и здесь интересные результаты получены по влиянию на водоудерживающую способность, дисперсность и осмотический потенциал почвенных физических систем природного и искусственного засоления, смены катионного состава (заряда) и концентрации электролитов, контролирующего ионно-электростатический барьер и соответствующую компоненту расклинивающего давления [17, 29, 42, 44, 50, 55, 58, 63, 65, 66], по воздействию нефтяного загрязнения, приводящего в больших дозах к снижению водоудерживающей способности из-за эффекта гидрофобизации твердой фазы, а в малых, – напротив, к росту влагоемкости и энергии водоудерживания по причине формирования дополнительного к ионно-



электростатическим взаимодействиям ПАВ-барьера, предохраняющего тонкодисперсные частицы от коагуляции и потери поверхностной энергии [17, 21, 44, 58]. Особый интерес представляют исследования влияния загрязняющих поверхностные воды синтетических ПАВ, включая стирально-моющие средства, на капиллярные эффекты в пористых физических системах, а также экспериментальное изучение ПАВ-модификаций поверхности твердой фазы жидкофазными и аэрозольными агентами гидрофобной и амфифильной природы в связи с проблемой почвенного конструирования [17, 32]. Среди фундаментальных успехов выделим разработку базового термодинамического уравнения, связывающего активность (полный потенциал) жидкой фазы с температурой [49, 62], фундаментальную нелинейную зависимость концентрационных характеристик почвенных растворов (активной концентрации, осмотического потенциала, электропроводности) от массовой доли влаги (влажности) и физико-статистическую модель этого явления [63], развитие термодинамической теории сорбции газов и паров в почвенных физических системах с использованием физически-обоснованных равновесных и кинетических моделей межфазных взаимодействий (растворения-дегазации, адсорбции-десорбции), выявление важной роли этих процессов при количественной оценке биологической активности почв по эмиссии и поглощению газообразных веществ (почвенному дыханию) и ряд других разработок [15, 43, 45, 46]. Резюмируя обзор, еще раз отметим, что все вышеназванные достижения кафедры являются закономерным итогом генерального направления ее развития, заложенного основополагающими работами нашего незабвенного Учителя – Анатолия Даниловича Воронина, чей творческий интеллект, научная эрудиция, нестандартность мышления и умение предвидеть события обеспечили ему безусловное первенство в отечественной физике и термодинамике почв XX века.

Благодарности

Работа осуществлена при поддержке РНФ и РФФИ (проекты № 16-16-04014, 17-77-20046, №19-29-05006).

Литература

1. Белюченко И.С., Смагин А.В., Попок Л.Б., Попок Л.Е. (2015) Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании. – Краснодар: Изд-во КубГАУ. 312 с.
2. Березин П.Н. (1987) Структурно-функциональные и гидрофизические свойства набухающих почв // в сб. «Современные физические и химические методы исследования почв». – М.: Изд-во Моск. Ун-та. С. 20-46.
3. Березин П.Н., Воронин А.Д., Шеин Е.В. (1985) Основные параметры и методы количественной оценки почвенной структуры. *Почвоведение* **10**, 58-67.
4. Воронин А.Д. (1984) Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 204 с.
5. Воронин А.Д. (1986) Основы физики почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 244с.
6. Воронин А.Д. (1990) Энергетическая концепция физического состояния почв. *Почвоведение* **5**, 7-19 .
7. Воронин А.Д., Скалабан В.Д. (1978) Соотношение между полным, капиллярно-сорбционным и осмотическим потенциалом воды в почве. *Почвоведение* **12**, 121-125



8. Егоров Ю.В., Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Судницын И.И., Кириченко А.В. (2015) Инструментальные методы оптимизации увлажнения почвы. – М.: МАКС Пресс. 124 с.
9. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. (2001) Матричная организация почв. – М.: Рузаки, 295 с.
10. Манучаров А.С., Харитонов Г.В., Шеин Е.В. (2013) Реология в почвоведении. – М.: Университетская книга, 80 с.
11. Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. – М.: ГЕОС. 188 с.
12. Поздняков А.И. (2001) Полевая электрофизика почв. – М.: МАИК Наука/интерпериодика. 278 с.
13. Роде А.А. (2008) Избранные труды. Т. 3. Основы учения о почвенной влаге. – М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 664 с.
14. Сидорова М.А., Умарова А.Б., Смагин А.В., Хайдапова Д.Д., Бутылкина М.А. (2012) Лабораторные методы определения физических свойств торфяных и минеральных почв. – Тула: Гриф и К, 40 с.
15. Смагин А.В. (2005) Газовая фаза почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 301 с.
16. Смагин А.В. (2006) Почвенно-гидрологические константы: физический смысл и количественная оценка на базе равновесного центрифугирования. *Доклады по экологическому почвоведению* **1(1)**, 31-56.
17. Смагин А.В. (2012) Теория и практика конструирования почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 544 с.
18. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. (2001) Моделирование динамики органического вещества почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 120 с.
19. Смагин А.В., Садовникова Н.Б. (2009) Влияние сильнонабухающих полимерных гидрогелей на физическое состояние почв легкого гранулометрического состава. – М.: МАКС-Пресс. 208 с.
20. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Глаголев М.В., Кириченко А.В. (2006) Новые инструментальные методы и портативные электронные средства контроля экологического состояния почв и сопредельных сред. *Экол. вестн. Сев. Кавказа* **2(1)**, 5-17.
21. Смагин А.В., Григорьева И.Ю., Саркисов Г.А. (2016) Влияние углеводородного загрязнения на влажностные характеристики дисперсных грунтов и рост травянистой растительности. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология* **5**, 521-530.
22. Теории и методы физики почв. (2007)– Тула: Гриф и К. 616 с.
23. Умарова А.Б. (2011) Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. – М.: ГЕОС. 269 с.
24. Умарова А.Б., Шеин Е.В. (2009) Пространственно-временная организация конвективных потоков влаги в почве. *Вестник Одесского национального университета* **14**, 74-78.
25. Шеин Е.В. 2005. Курс физики почв. – М.: Изд-во Моск. Ун-та. 432 с.
26. Шеин Е.В., Дембовецкий А.В., Губер А.К. (1999) Педотрансфункции: получение, обоснование, использование. *Почвоведение* **11**, 1323-1331.
27. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Дембовецкий А.В., Тюгай З.Н. (2014) Новые приборы для изучения физических свойств почв: 3D- томография, реологические



- параметры, контактный угол. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета* **115(5)**, 44-48
28. Шейн Е.В., Рыжова И.М. (2016) Математическое моделирование в почвоведении. – М.: «ИП Маракушев А.Б.». 377 с.
 29. Azovtseva N.A., Smagin A.V. 2018. Dynamics of Physical and Physicochemical Properties of Urban Soils under the Effect of Ice-Melting Salts // *Eurasian Soil Sci.* **51(1)**, 120-129. DOI 10.1134/S1064229318010027
 30. Arkhangel'skaya T.A. (2009) Parameterization and Mathematical Modeling of the Dependence of Soil Thermal Diffusivity on the Water Content. *Eurasian Soil Sci.* **42(2)**, 162-172. DOI 10.1134/S1064229309020070.
 31. Dexter A. R. (2004) Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120**, 201–214.
 32. Egorov Yu. V., Kirichenko A.V., Bobkov A.V., Galitskii V.I. 2010. Averaged assessment of the soil moisture by medium-frequency dielectricity. *Eurasian Soil Sci.* **43(2)**, 187-193. DOI 10.1134/S1064229310020080
 33. Egorov Yu. V., Sudnitsin I.I., Bobkov A.V., Kirichenko A.V. (2013) Effect of the structure on the electrical properties of soils. *Eurasian Soil Sci.* **46(3)**, 284-290. DOI: 10.1134/S1064229313030022
 34. Khaydapova D., Milanovskiy E., Shein E. (2015) Rheological properties of different minerals and clay soils. *Eur. J. of Soil Sci.* **4(3)**, 198-202. DOI 10.18393/ejss.2015.3.198-202
 35. Khaidapova D.D., Klyueva V.V., Skvortsova E.B., Abrosimov K.N. (2018) Rheological Properties and Tomographically Determined Pore Space of Undisturbed Samples of Typical Chernozems and Soddy-Podzolic Soils. *Eurasian Soil Sci.* **51(10)**, 1191-1199. DOI 10.1134/S106422931810006X
 36. Mady A.Y., Shein E.V. (2018) Support Vector Machine and Nonlinear Regression Methods for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* **73**, 42-47. DOI 10.3103/2FS0147687418030079
 37. Pachepsky Ya.A., Timlin D., Varallyay G. (1996) Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, 727–733.
 38. Sadovnikova N.B., Smagin A.V., Sidorova M.A. (2014) Thermodynamic Assessment of the Effect of Strongly Swelling Polymer Hydrogels on the Water Retention Capacity of Model Porous Media. *Eurasian Soil Sci.* **47(4)**, 287–296. DOI: 10.1134/S1064229314040061
 39. Sidorova M.A., Borisova E.O. (2018) Moisture Regime of Loamy Sandy Soils of Moscow Meshchera Region under the Impact of Different Surface Planning Operations. *Eurasian Soil Sci.* **51(8)**, 976-984. DOI 10.1134/S1064229318080112
 40. Shein E.V., Arkhangel'skaya T.A. (2006) Perdotransfer functions: state of the art, problems, and outlooks. *Eurasian Soil Sci.* **39(10)**, 1089-1099. DOI 10.1134/S1064229306100073
 41. Shein E.V., Mady A.Y. (2018) Hysteresis of the water retention curve: wetting branch simulation based on the drying curve. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* **73(3)**, 124-128
 42. Shcherba T.E., Kust G.S., Smagin A.V., Andreeva O.V., Slavko V.D. (2016) Diagnostics of Desertification with the Use of Water Retention Curve of Soils. *Arid Ecosyst.* **6(4)**, 249-259. DOI:10.1134/S2079096116040090
 43. Smagin A.V. (2000) The Gas Function of Soils. *Eurasian Soil Sci.* **33(10)**, 1211-1223.



44. Smagin A.V. (2003) Theory and methods of evaluating the physical status of soils. *Eurasian Soil Sci.* **36(3)**, 301-312.
45. Smagin A.V. (2006) Soil phases: the gaseous phase. In: Certini G., Scalenghe R. (ed.) *Soils: Basic Concepts and Future Challenges*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo. P. 75-85.
46. Smagin A.V. (2008) Experimental estimation of the energy parameters of molecular interactions in soils. *Colloid J.* **70(4)**, 473–477. DOI: 10.1134/S1061933X0804011X
47. Smagin A.V. (2011) Physically based mathematical models of the water vapor sorption by soils. *Eurasian Soil Sci.* **44(6)**, 659–669. DOI: 10.1134/S1064229311060135
48. Smagin A.V. (2012) Column-Centrifugation Method for Determining Water Retention Curves of Soils and Disperse Sediments. *Eurasian Soil Sci.* **45(4)**, 416–422. DOI: 10.1134/S1064229312040126
49. Smagin A.V. (2016) Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids. *Colloid J.* **78(3)**, 391–396. DOI: 10.1134/S1061933X16030170
50. Smagin A.V. (2018) About Thermodynamic Theory of Water Retention Capacity and Dispersity of Soils. *Eurasian Soil Sci.* **51(7)**, 782–796. DOI: 10.1134/S1064229318070098
51. Smagin A.V., Smirnov G.V. (1991) Use of Gas-Chromatography to Determine the Sorption Isotherms of Water-Vapor in Soil. *Eurasian Soil Sci.* **24(2)**, 119-124.
52. Smagin A.V., Sadovnikova N.B. (1995) Impact of Strongly Swelling Hydrogels on Water-Holding Capacity of Light-Textured Soils. *Eurasian Soil Sci.* **27(12)**, 50-55.
53. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Mizuri Maauia Ben Ali (1998) The Determination of the Primary Hydrophysical Function of Soil by the Centrifuge Method. *Eurasian Soil Sci.* **31(11)**, 1237-1244.
54. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nazarova T.V., Kiryushova A.B., Mashika A.V., Eremina A.M. (2004) The effect of organic matter on the water-retention capacity of soils. *Eurasian Soil Sci.* **37(3)**, 267 – 275.
55. Smagin A.V., Manucharov A.S., Sadovnikova N.B., Kharitonova G.V., Kostarev I.A. (2004) The effect of exchangeable cations on the thermodynamic state of water in clay minerals. *Eurasian Soil Sci.* **37(5)**, 473 – 478.
56. Smagin A.V., Prusak A.V. (2008) The Effect of Earthworm Coprolites on the Soil Water Retention Curve. *Eurasian Soil Sci.* **41(6)**, 618–622. DOI: 10.1134/S1064229308060069
57. Smagin A.V., Khakimova G.M., Khineeva D.A., Sadovnikova N.B. (2008) Gravity Factor of the Formation of the Field and Capillary Water Capacities in Soils and Artificial Layered Soil-Like Bodies. *Eurasian Soil Sci.* **41(11)**, 1189–1197. DOI: 10.1134/S1064229308110070
58. Smagin A.V., Kol'tsov I.N., Pepelov I.L., Kirichenko A.V., Sadovnikova N.B., Kinzhaev R.R. (2011) The physical state of finely dispersed soil-like systems. *Eurasian Soil Sci.* **44(2)**, 163–172. DOI: 10.1134/S1064229311020128
59. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nikolaeva E.I. (2014) Thermodynamic Analysis of the Effect of Strongly Swelling Polymer Hydrogels on the Physical State of Soil and Sediment Samples. *Eurasian Soil Sci.* **47(2)**, 78–88. DOI: 10.1134/S1064229314020100
60. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Smagina M. V. (2014) Biodestruction of Strongly Swelling Polymer Hydrogels and Its Effect on the Water Retention Capacity of Soils. *Eurasian Soil Sci.* **47(6)**, 591–597. DOI: 10.1134/S1064229314060088



61. Smagin A.V., Sadovnikova N.B. (2015) Creation of Soil-Like Constructions. *Eurasian Soil Sci.* **48(9)**, 981–990. DOI:10.1134/S1064229315090100
62. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Bashina A.S., Kirichenko A.V., Vityazev V.G. (2016) Theoretical and experimental substantiation of a thermogravimetric method for assessing the water-retention capacity and specific surface area of disperse systems. *Eurasian Soil Sci.* **49(12)**, 1382–1391. DOI: 10.1134/S1064229316100136
63. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Kirichenko A.V., Egorov Yu.V., Vityazev V.G., Bashina A.S. (2018) Dependence of the Osmotic Pressure and Electrical Conductivity of Soil Solutions on the Soil Water Content. *Eurasian Soil Sci.* **51 (12)**, 1440–1451. DOI: 10.1134/S1064229318120128
64. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Vasenev V.I., Smagina M.V. (2018) Biodegradation of Some Organic Materials in Soils and Soil Constructions: Experiments, Modeling and Prevention. *Materials* **11(10)**, **1889**, 1-22. DOI:10.3390/ma11101889
65. Sudnitsyn I.I. (2017) Landau-Deryagin law and hydration energy of soils of different genesis. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* **72(3)**, 106-112. DOI 10.3103/S0147687417030085
66. Sudnitsyn I.I., Smagin A.V., Shvarov A.P. (2012) The Theory of Maxwell–Boltzmann–Helmholtz–Gouy about the Double Electric Layer in Disperse Systems and Its Application to Soil Science (On the 100th Anniversary of the Paper Published by Gouy). *Eurasian Soil Sci.* **45(4)**, 452–457. DOI: 10.1134/S106422931204014X
67. Sudnitsyn I.I., Egorov Yu V., Bobkov A.V., Kirichenko A.V. (2014) The Influence of Soil Structure on Its Hydrophysical Properties. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* **69(1)**, 11-16 DOI 10.3103/2FS0147687414010098
68. Tygai Z., Shein E.V., Milanovskiy E.Y. (2010) The Effect of Soil Organic Matter on the Difference between Particle-Size Distribution Data Obtained by the Sedimentometric and Laser Diffraction Methods. *Anadolu J. Agric. Sci.* **25(2)**, 63-66.
69. Umarova A.B., Shein E.V., Milanovskiy E.Yu (2010) Preferential water flows in technogenic soils. *Anadolu J. Agric. Sci.* **25(2)**, 114-119.
70. Umarova A.B., Samoilov O.A. (2011) The Study of Preferential Water Flows and Convective Heat Transfer using the Method of Temperature Labeling. *Eurasian Soil Sci.* **44(6)**, 670-676 DOI 10.1134/S1064229311060160



УДК 631.4

АРХИТЕКТУРА ПОЧВ: РАЗВИТИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА А.Д. ВОРОНИНА

Умарова А.Б.¹, Бутылкина М.А.¹, Ежелев З.С.¹, Кокорева А.А.¹, Сусленкова М.М.¹, Хмелева М.В.¹,
Быкова Г.С.¹, Гасина А.И.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
a.umarova@gmail.com

SOIL ARCHITECTURE: DEVELOPMENT OF A.D. VORONIN'S STRUCTURALLY FUNCTIONAL APPROACH

Umarova A.B., Butylkina M.A., Ejelev Z.S., Kokoreva A.A. Suslenkova M.M.,
Hmeleva M.V., Bykova G.S., Gasina A.I.,
Lomonov Moscow State University, Faculty of Soil Science

Annotation: The paper presents the results of a study of the spatial organization of the solid phase of soils in relation to its functional characteristics. A comparison of the morphology and microstructure of the aggregates of sod-podzolic soil and chernozem showed that there is a relationship between the shape and size of the aggregates and the filtration coefficient. Electron microscopy of soil aggregates showed the differences in the microstructure of the studied soils, which is reflected in the degree of their resistance to water. The transformation of microstructure of constructozems was studied in a four-year-long (2012–2016) field experiment with the use of hydrological and electron microscopy methods. It is clearly correlated to the soil microstructure curves, especially in the organic horizons: Ap and peat. Our studies suggest that the soil architecture is a spatial organization of solid-phase soil components that form the structure of the pore space, which is hierarchical, functional differentiation, stability, development, and formed under the influence of biotic and abiotic environmental factors.

Введение

Формирование представлений об архитектуре почв основывается на работах российских ученых о структуре почв. Исследования В.В. Докучаева, С.А. Захарова, Б.Г. Розанова привели к созданию морфологического подхода оценки структуры на основе формы и размера агрегатов. Большое количество работ посвящено исследованию устойчивости структуры к воздействию воды и механическому воздействию. В настоящее время продолжают развиваться фундаментальные исследования в области структурообразования, которые включают изучение свойств поверхности твердой фазы почв, роли органического вещества, разработку различных структуров и полимеров. И, конечно, важное значение имеют работы в области почвенной микробиологии, согласно которым почва представляет собой совокупность огромного количества экологических ниш. В 1984 году вышла книга А.Д. Воронина «Структурно-функциональная гидрофизика почв» [1], в основу его исследований были положены общепринятые принципы равновесной термодинамики. В ней он представил концепцию иерархии уровней структурной организации почв. Функционирование почв он рассмотрел с позиции удерживания воды. Этим самым, А.Д. Воронин объединил структурные и функциональные характеристики почв на разных уровнях ее организации. Во второй половине 20 в. зарубежными учеными были начаты работы по исследованию преимущественных потоков влаги, не отвечающих представлениям равновесной термодинамики, обусловленные фильтрационной неоднородностью порового пространства почв. В итоге в последние годы возникло новое понятие в почвенной физике – архитектура почвы [2]. Данный термин весьма удачен, так как он позволяет одновременно рассматривать пространственную и функциональную организацию почв. И по аналогии с неким зданием возможно рассмотрение почвенного здания. В этом случае основным элементом почвы



являются элементарные почвенные частицы, объединяющиеся в агрегаты, и образующие отдельные горизонты и почвенный профиль. По аналогии с терминами архитектуры зданий эти элементы характеризуются теми же свойствами: составом, дисперсностью, устойчивостью к внешним воздействиям и др. В качестве путей быстрой миграции влаги выступают трещины и макропоры, представляющие собой вертикальные транспортные системы почв. Устойчивость почвенного здания поддерживается структурными связями в агрегатах, кутанными комплексами и другими поверхностными и внутриагрегатными образованиями. На каждом уровне пространственной организации почв есть свои методы для получения определенных характеристичных параметров. Функциональная организация почв также иерархична, и для каждого уровня есть свои методы изучения и параметры оценки. Специфика наших исследований обусловлена фундаментальными и методическими подходами к исследованию почвенной структуры. Это: (1) Генетический подход к исследованию, заключающийся в понимании необходимости исследования основных зональных типов почв, как природных систем, образованных в результате воздействия факторов почвообразования, отражающихся в особенностях архитектуры почвенных профилей. (2) Эволюционный подход к исследованию трансформация почвенных свойств. (3) Использование комплекса полевых и лабораторных методов исследования: визуальных, функциональных, моделирование и проч. Целью данной работы явилось исследование архитектуры почв зонального ряда как взаимосвязь пространственных и функциональных характеристик почв и изучение почвенной архитектуры в процессе функционирования на примере специально созданных почвенных конструкций разного строения.

Объекты и методы

Для изучения архитектуры почв в исследование были включены дерново-подзолистые почвы Московской области, черноземы типичные Курской области, черноземы слитые Республики Адыгея, бурые лесные почвы и желтоземы Краснодарского края. Все варианты представляли собой нативные почвы, не вовлеченные в сельскохозяйственный оборот. Для изучения трансформации архитектуры почв созданы модельные почвенные конструкции на территории МГУ имени М.В.Ломоносова в 2012 г. Были созданы два варианта конструктоземов: (1) слоистый почвенный профиль состоящий из последовательно размещенных гор.Апах, торф низинный, песок карьерный, гор. Апах; (2) смесь вышеперечисленных горизонтов в том же массовом соотношении, что и варианте 1, и подстилаемый гор Апах. Подробное описание схемы и последовательности закладки почвенных конструкций представлено в работе Сусленковой М.М. с соавт. [3].

Были использованы следующие методы изучения почвенной структуры [4]: сухое просеивание по Савинову, определение водоустойчивости агрегатов по Андрианову, определение микроструктуры на фракциях размером около 10 мм методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JSM-6380LA. Просмотр поверхности агрегатов и срезов велся по сетке, из 16-20 фотографий для каждого поля просмотра были выбраны наиболее типичные картины микроморфологии почв [3]. Изучение сорбции проводилось методом термостатирования над насыщенными растворами солей

Результаты и обсуждение

Изучение морфологии и размеров почвенных агрегатов исследованных почв выявило разнообразие их размеров, форм, степени угловатости и окатанности. Визуально выделяются чернозем типичный и бурая лесная почва округлой формой агрегатов по всему профилю и их равномерным распределением по размеру. В дерново-подзолистых, слитых черноземных



почвах и в желтоземах преобладают глыбистые фракции размером более 10 мм. Определение значений коэффициента фильтрации показало, что разнообразие форм агрегатов и их дифференцированность по профилю снижает скорость передвижения влаги. Так, дерново-подзолистая почва, имеющая комковатую структуру верхнего горизонта, выраженную пластинчатую форму агрегатов подзолистого горизонта и столбчатую – нижних слоев, значительно медленнее фильтрует влагу, чем чернозем с равномерной зернистой структурой по всему профилю.

Микроморфология почвенных агрегатов почвенных агрегатов, определенная методом СЭМ (рис.1) показала, что внутренняя и внешняя поверхности агрегатов дерново-подзолистой почвы морфологически весьма схожи.



Рис.1. СЭМ-снимки почвенных агрегатов гумусовых горизонтов, увеличение: 1 - $\times 500$ (- 500 μm)

Отличными от него свойствами обладал чернозем, в нем проявляется связность, слитность и однородность органико-минеральной массы внутренней части агрегатов. Такая пространственная организация твердой фазы обладает разной устойчивостью к воздействию воды. Оказалось, что морфологически слабо связанные агрегаты дерново-подзолистой почвы полностью распадаются в первые минуты их погружения в воду, а цементированные органическим веществом и соединениями кальция агрегаты чернозема - весьма устойчивы к воздействию воды.

Таким образом, пространственная организация твердой фазы почв обуславливает ее функциональные характеристики и может явиться диагностическим свойством почвы. Если пространственная организация твердой фазы определяет функционирование почвы, то можно предположить, что из одного и того же материала можно создавать совершенно разные грунтовые сооружения по строению, функционированию и устойчивости к воздействиям окружающей среды. Однако, не ясно, насколько возможно создание определенной архитектуры почв, которая будет функционировать заданным образом в соответствии с поставленной целью? Будет ли она стабильной во времени?

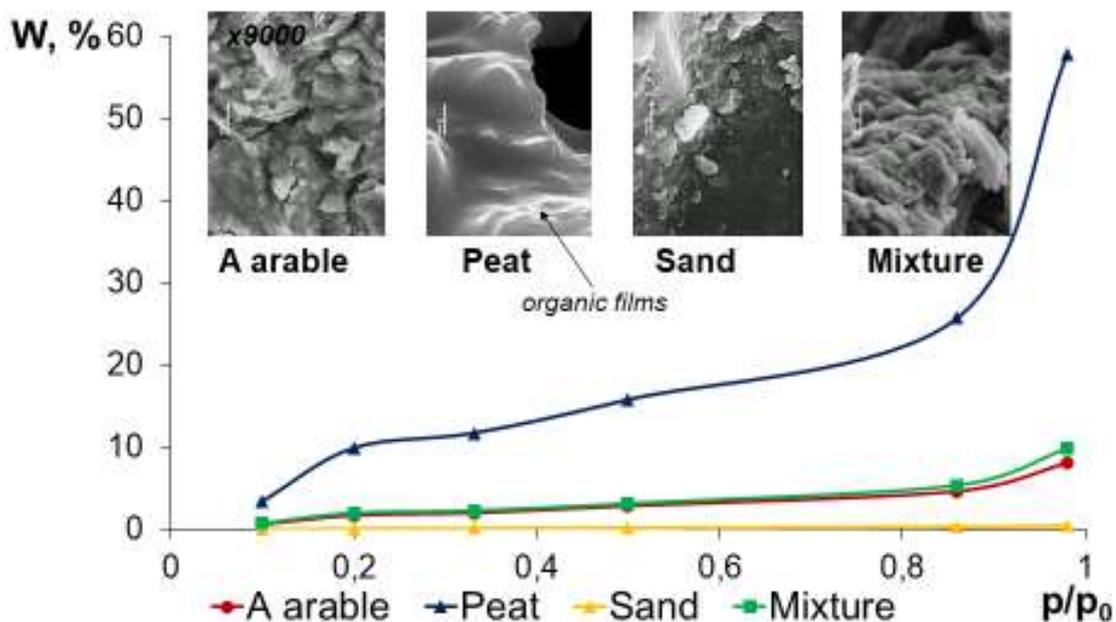
Современное почвоведение характеризуется тем, что в последние годы появилось большое количество новых объектов исследования, таких как почвенные конструкции, сложенные из различных почвенных субстратов. Эти новые почвенные системы функционируют в новых условиях, что ведет к быстрой трансформации свойств почвы.

Для исследования эволюции почв рассмотрим трансформацию сорбционных свойств почвенных конструкций в первые годы их функционирования. На рис. 2 представлены изотермы десорбции паров воды субстратов, которые были использованы для создания конструктороземов. Выделяется торф очень высокой сорбционной способностью. Изучение поверхности торфа под электронным микроскопом при увеличении 9000 раз показало, что отчетливо выделяется ровная опалесцирующая при электронной микроскопии поверхность,



создающая впечатление некой воскоподобной структуры, покрывающей и полностью сглаживающей поверхность твердой фазы торфа, свечение которой свидетельствует о ее органической природе. Такая картина наблюдалась для всех полей зрения.

Закономерно низкая сорбция в песке. Пахотный горизонт и смесь субстратов расположены очень близко. Причем горизонт А пах в 2012 году имел весьма сомкнутое плотно упакованное строение поверхности с визуально выделяемыми микроагрегатами и элементарными почвенными частицами. В смеси выделяются отдельные фрагменты субстратов. Очень сильные изменения к четвертому году функционирования в составе слоистого конструктозема обнаружены для торфяного слоя (рис. 2,б). Несмотря на то, что изотерма торфа по сравнению с другими слоями продолжает оставаться расположенной гораздо выше кривых остальных слоев данного варианта, в нем наблюдается резкое снижение сорбционных характеристик по сравнению с 2012 г. Микроскопирование поверхности его монолита показало практически полное исчезновение органической пленки к 2016, которая обнаруживается лишь фрагментарно в отдельных полостях (рис.2, б). В варианте 2, представляющем смесь горизонтов, происходит снижение водоудерживания, наблюдается дифференциация кривых: степень смещения кривых относительно изотермы 2012 г. уменьшается с глубиной отбора образца. Таким образом, проведенные исследования на почвенных конструкциях, состоящих количественно и качественно из одних и тех же генетических горизонтов, но имеющие разное строение или пространственную организацию твердой фазы, по-разному удерживают влагу и эволюционируют в процессе их функционирования.



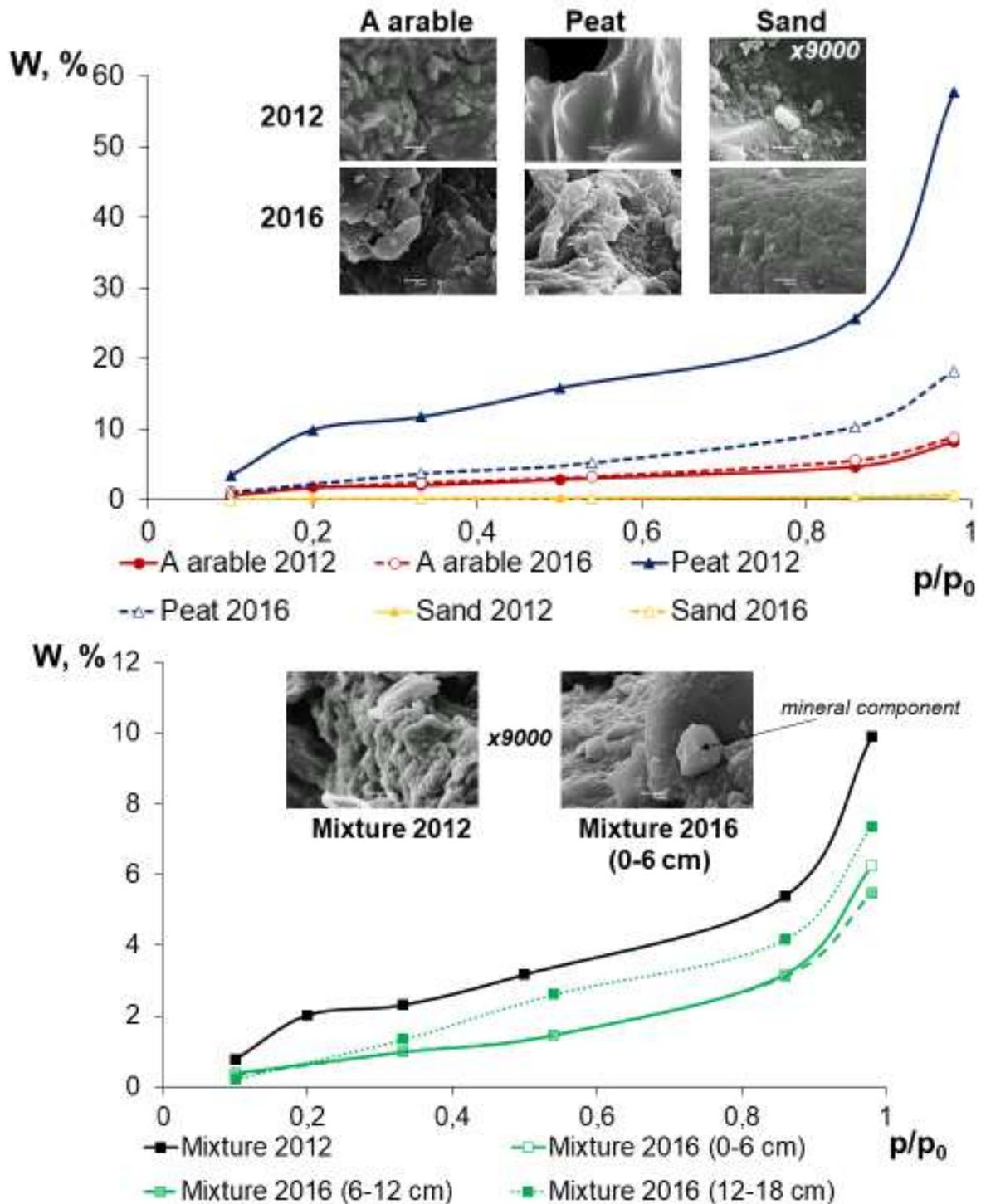


Рис.2. Изотермы десорбции паров воды и СЭМ-снимки почв при увеличении $\times 9000$: а) исходные почвенные субстраты, 2012 г., б) вариант 1, 2016 г., в) вариант 2, 2016 г.

Выводы

Существует тесная взаимосвязь почвенной архитектуры и функционирования почв, выражающаяся в способности почв удерживать и проводить влагу, сопротивляться внешним воздействиям. Пространственная организация почв определяет их функционирование, трансформацию и эволюцию. Таким образом, можно определить, что архитектура почв – это пространственная организация твердофазных компонентов почв, образующих структуру



порового пространства, обладающая иерархичностью, функциональной дифференцированностью, устойчивостью, развитием и формирующаяся под воздействием биотических и абиотических факторов окружающей среды.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проекты № 19-04-01298, 18-34-00801 мол_а).

Литература

1. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. 1984. Изд-во: МГУ. 205 с. (http://www.pochva.com/?content=3&book_id=0297)
2. https://www.researchgate.net/conference-event/CESAR_International-Conference-and-Exploratory-Workshop-on-Soil-Architecture-and-Physico-Chemical-Functions_2010/2818
3. М.М.Suslenkova, А.В.Umarova, М.А.Бутылкина (2018). Microstructure of soils of different geneses and its transformation in constructozems of Moscow// *Eurasian Soil Science*, Vol. 51, №10. p. 1220-1228 doi: 10.1134/S1064229318100125
4. Теории и методы физики почв (2007) //М., Издательство «Гриф и К», с. 616



УДК 631.412:631.74

ВТОРИЧНЫЕ КАРБОНАТЫ В ЭДАФИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМ

Харитонов Г.В.¹, Шеин Е.В.^{2,3}, Крутикова В.О.^{1,4}, Остроухов А.В.¹

¹ИВЭП ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация
gkharitonova@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

³Почвенный институт, Москва, Российская Федерация
evgeny.shein@gmail.com

⁴ИТиГ ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация
nm32697@gmail.com

SECONDARY CARBONATES IN EDAPHIC COMPONENTS OF ECOSYSTEMS

Kharitonova G.V.¹, Shein E.V.^{2,3}, Krutikova V.O.^{1,4}, Ostrouhov A.V.¹

¹IWER, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

²Soil Science Department, MSU, Moscow, Russian Federation

³Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

⁴ITG, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

Annotation: The paper considers some examples of metastable polymorph modifications of calcium carbonate (vaterite and aragonite) in edaphic ecosystem components. Microforms of vaterite are formed in presence of low molecular weight amino acids. In turn, formation microforms of aragonite associated with extremely high salinity of water.

Введение

Карбонат кальция важная составляющая эдафических компонентов экосистем (почвы, речные взвеси, донные отложения рек и озер). Основное внимание исследователей уделяется кальциту, наиболее термодинамически стабильной полиморфной модификации CaCO_3 (процессы формирования, содержание и морфология проявлений) (Lal et al., 2016). Климат, количество осадков и температура, является определяющим фактором формирования и локализации кальцита в почвах. Накопление кальцита вблизи поверхности почвы является общим для засушливых и полузасушливых зон от пустынь Азии до холодных долин Антарктики. Образование кальцита в поверхностных водах рек и озер и, соответственно, в донных отложениях является также характерным процессом аридных и семиаридных зон (Strakhov et al., 1954). Поверхностные воды гумидной зоны недонасыщены CaCO_3 , соответственно кальцит не накапливается ни в аллювии, ни в донных отложениях.

Две другие менее стабильные и более растворимые модификации CaCO_3 (арагонит и ватерит) являются важными прекурсорами карбонат-образующих систем (Friedman, Schultz, 1994), но изучены явно недостаточно. Основная причина, в естественных условиях они встречаются много реже за исключением биогенных образований. Арагонит, лишь изредка находят в почвах (Wing, 2016), в озерных отложениях он встречается чаще. Ватерит был получен в лабораторных условиях, и до последнего времени считалось, что в природных условиях он не образует минеральных форм. При контакте с водой ватерит крайне нестабилен и при комнатной температуре переходит в кальцит в течение 20–25 мин., при температурах $>60^\circ\text{C}$ образуется арагонит в течение 60 мин. В буровых растворах он более долговечен (20–45 лет). В природных водах его обнаружили лишь в 1971 г. (оз. Холкхэм, Великобритания).



Редкие случаи образования ватерита были зарегистрированы в зонах теплового метаморфизма и при проведении буровых работ (Friedman, Schultz, 1994).

Задача работы является изучение проявления метастабильных модификаций карбоната кальция (арагонит и ватерит) в речных взвесах и донных отложениях рек и озер различных природных зон.

Объекты и методы

В качестве объектов исследования были выбраны речные (р. Иордан, Иордания, т. 1) и озерные (Большое Соленое озеро, США, т. 2) донных отложений аридных и гумидных зон (река Симми, бассейн р. Амур, Дальний Восток, Россия, тт. 3 и 4). Кроме того, были изучены керны льда (р. Амур, Хабаровский водный узел, Дальний Восток, Россия, т. 5).

Основные методы исследования – гранулометрический и валовой анализы, растровая электронная микроскопия (РЭМ). РЭМ анализ образцов был проведен с использованием VEGA 3 LMH (TESCAN, Czech Republic). Энерго-дисперсионный спектрометр X-max 80 (Oxford Instruments, UK) был использован для анализа элементного состава наиболее представительных участков. Гранулометрический состав (без разложения карбонатов) определяется методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц SALD-2300 (SHIMADZU, Japan). Валовой состав определяли методом рентгеновской флуоресценции (РФА) (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). РЭМ и РФА анализы проводились в аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН, Хабаровск.

Результаты и обсуждение

Согласно валовому анализу, содержание кальция и, соответственно, карбонатов в исследованных образцах соответствует климатической зональности мест отбора образцов: их содержание в отложениях аридной зоны много выше, чем гумидной. Высокодисперсные донные отложения р. Иордан характеризуются чрезвычайно высоким содержанием кальция (более 40% CaO от общего состава). Отложения р. Симми (нижнее течение) имеют близкий гранулометрический состав (преобладание ила), но поскольку река находится в гумидной зоне, содержание кальция почти на два порядка ниже.

В амурских кернах льда CaCO_3 был обнаружен в слое (43–52 см), сформированном в конце ледостава при максимально высоком содержании в воде бикарбоната HCO_3^- (до 60–80 мг/л). Он представлен главным образом слабо и умеренно окристаллизованными частицами размером до 100–200 мкм. Но встречаются и отдельные не окристаллизованные сферические частицы размером 60 мкм. Подобные образования, диагностированные как ватерит, были обнаружены в надледниковых ручьях северной части острова Эллесмер, канадская Арктика. Морфология обнаруженных нами частиц и близкие условия их формирования позволяют с достаточной долей уверенности предполагать, что это ватерит.

Поскольку ватерит не был диагностирован в донных отложениях, но был найден в кернах льда Среднего Амура, мы попытались оценить возможность его формирования в отложениях Нижнего Амура, где гораздо холоднее, и почвы промерзают на глубину до 160 см. Для этого была выбран р. Симми (бассейн р. Амур). Как показали РЭМ и ЭДС анализы, донные отложения р. Симми характеризуются относительно высоким содержанием CaTiSiO_5 . Однако, CaCO_3 был обнаружен только в озерно-речных отложениях реки (т. 3) в виде редких агломератов размером до 5 мкм. Кроме того, были обнаружены необычные микроформы CaCO_3 – тороиды с внутренним диаметром 8–10 мкм и радиусом поперечного сечения в 1 мкм. Подобные тороидные микроформы CaCO_3 мы обнаружили и в торфяных отложениях



Амурского бассейна. Образцы торфа были любезно предоставлены М.А. Климиным и А.Ю. Песковым.

В свою очередь донные отложения р. Иордан характеризуются крайне высоким содержанием CaCO_3 (до 40% CaO). Он представлен как литогенным кальцитом, так и новообразованиями слабо окристаллизованного тригонального кальцита, и его игольчатыми кристаллами. Встречаются также пористые микроагрегаты кальцита размером до 200 мкм из микритовых частиц. Как и в донных отложениях р. Симми были найдены тороидные микроформы CaCO_3 .

Из-за трудности выделения тороидальных микроформ CaCO_3 из природных образцов мы не смогли установить их полиморфную принадлежность. Но Jiang W. с коллегами (Jiang et al., 2017) удалось блестяще решить эту проблему в лабораторном эксперименте. Они показали, что тороидальные микроформы ватерита, иерархически организованной архитектуры, образуются в присутствии хиральных L- и D-аминокислот Asp и Glu. Следует отметить высокую стабильность этих супраструктур. Так возраст торфяных отложений, в которых были найдены тороидальные микроформы CaCO_3 , составляет более 6000 лет (Bazarova et al., 2018).

В аридной зоне в донных отложениях бессточных озер с экстремально высокой соленостью стабильна другая полиморфная модификация CaCO_3 – арагонит. Наиболее яркий пример арагонитовых образований – это знаменитые ооиды Большого Соленого озера. Образец 5 был выбран в нескольких метрах от кромки воды озера. Содержание CaO в образце высокое, более 16%. Образец содержит множественные ооиды правильной сферической формы размером до 350 – 400 мкм. Их основная часть имеет идеально гладкую поверхность. Присутствуют также ооиды, в которых начались процессы перекристаллизации арагонита в кальцит. Последнее приводит к их коррозии и сокращению размера до 250–300 мкм. Преобразование не является твердофазной реакцией: перекристаллизация происходит за счет растворения арагонита и соответствующего роста кристаллов кальцита. Встречаются также пористые микроагрегаты из микритовых частиц кальцита. По-видимому, это результат разрушения арагонитовых ооидов вне «среды обитания» (соленая вода озера): амплитуда колебаний уровня воды в озере составляет 5 м.

Выводы

В работе представлены данные о проявлениях метастабильных модификаций карбоната кальция (ватерит и арагонит) в эдафических компонентах экосистем (речные взвеси, речные и озерные донные отложения) различных природных зон – реки Амур, Симми (Хабаровский край, Россия) и Иордан (Иордания); Большое соленое озеро (США). В природных условиях ватерит, метастабильная полиморфная модификация CaCO_3 , может встречаться в холодном (речной лед) и экстрахолодном климате (надледниковые ручьи) в виде сферических частиц размером до 10–100 мкм.

В лабораторных условиях *ex situ* тороидальные микроформы ватерита, иерархически организованной архитектуры, образуются в присутствии хиральных L- и D-аминокислот Asp и Glu (Jiang et al., 2017). Тороиды ватерита имеют внутренний диаметр 8–10 мкм и радиус поперечного сечения в 1 мкм. Подобные тороидальные микроформы CaCO_3 мы обнаружили *in situ* в речных отложениях (рр. Иордан, Симми) и в толще торфа (бассейн р. Амур, Хабаровский край). Возраст торфяных отложений, в которых были найдены тороидальные микроформы CaCO_3 , составляет более 6000 лет. По-видимому, формирование и стабильность тороидальных микроформ ватерита не только в лабораторных, но и в природных условиях связаны с присутствием низкомолекулярных аминокислот.



В донных отложениях бессточных озер аридной зоны (Большое Соленое озеро, США) в форме ооидов проявляется другая полиморфная модификация CaCO_3 , арагонит. Стабильность арагонитовых ооидов определяется чрезвычайно высокой соленостью воды. Вне «среды обитания» (соленая вода озера) стабильность арагонитовых ооидов нарушается.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проекты № 19-04-01056).

Литература

- Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. (1954). Основные черты питания современных внутри-континентальных водоемов осадочным материалом. Москва: Изд-во АН СССР, 792 с.
- Bazarova V.B., Klimin M.A., Kopoteva T.A. (2018). Holocene dynamics of the East-Asian monsoon in the Lower Amur area. *Geography and natural resources* 39(3), 239–247.
- Friedman G. M., Schultz D. J. (1994). Precipitation of vaterite (CaCO_3) during oil field drilling, *Mineral. Mag.* 58, 401–408.
- Jiang W., Pacella M.S., Athanasiadou D., Nelea V., Vali H., Hazen R.M., Gray J.J., McKee M.D. (2017). Chiral acidic amino acids induce chiral hierarchical structure in calcium carbonate. *Nature Communications* 8: 15066.
- Lal R., Kimble J.M., Eswaran H., Stewart B.A. (2000). *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*. CRC Press, Boca Raton, Fla.: Lewis, 305 p.
- Wing D.W. (2016). Carbonates. In Lal R. (Ed.) *Encyclopedia of Soil Science*, CRC Press Taylor & Francis Group: 202–205.



УДК 631.4

КОНЦЕПЦИЯ «СЕКУЩИХ» А.Д. ВОРОНИНА И ЕЁ СОВРЕМЕННОЕ ЗВУЧАНИЕ

Шейн Е.В.^{1,2}, Дембовецкий А.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация,

²Почвенный институт им.В.В. Докучаева

evgeny.shein@gmail.com

Shein E.V., Dembovetskiy A.V.

¹Lomonov Moscow State University, Faculty of Soil Science

²V.V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russia

Annotation: The hypothesis of the analysis of the water retention curve (WRC) with the help of the so-called “cutting lines” or simply “Voronin’s interceptors” is the theoretical part of the WRC analysis in soil hydrophysics. A.D. Voronin, on the basis of a large experimental material and an analysis of the known theories of the rheological behavior of soils, suggested description of soil moisture state by straight lines in the axes pF – mass moisture. In justifying the “interceptors” A.D. Voronin proceeded from the physical essence of the phenomenon of equilibrium soil moisture and rheological states of the soil. Modern hydrological pedotransfer functions are mainly statistical in nature, not taking into account the physical justification of the phenomenon.

Одной из центральных научных гипотез, развиваемых А.Д. Ворониным, является гипотеза анализа основной гидрофизической характеристики (ОГХ) с помощью так называемых «секущих» или просто «секущих Воронина», которая вместе с расчетом «средней» части ОГХ (содержания и состояния капиллярно-пленочной влаги), составили основную теоретическую часть использования ОГХ в отечественной гидрофизике почв. Разработанные А.Д. Ворониным положения о теоретическом анализе ОГХ активно использовались современниками и особенно учениками А.Д. Воронина, что отражалось в большом количестве статей, диссертаций, дипломных работ, в которых имелись ссылки и непосредственно использовались эти гипотетические положения А.Д. Воронина о связи реологического и энергетического состояний почвы. С опубликования и активного использования этой концепции прошел заметный период развития физики почв. Поэтому интересно задаться вопросом – каково в данный момент состояния физики почв отношение и использование этой творческой научной идеи А.Д. Воронина?

Это направление получило начальный толчок от идеи С.В. Нерпина (Нерпин, Чудновский, 1975) о критических потенциалах почвенной влаги, отделяющих гравитационную влагу от капиллярной, капиллярно-сорбционной, пленочной и адсорбированной. Критические потенциалы, по мнению С.В. Нерпина и многих других ученых-гидрофизиков почв разделяли различные формы воды в почве: адсорбированную, пленочную, капиллярно-сорбционную, капиллярную и гравитационную. Разделение почвенной влаги на формы традиционно для российского почвоведения, и вполне (иногда с оговорками) принимается всеми физиками почв. Однако, численные границы указанных потенциалов и соответствующих форм воды в почве не были определены. А.Д.Воронин на основании большого экспериментального материала, анализа известных теорий реологического поведения почв предложил следующие выделения, составившие прямые линии в осях pF – массовая влажность (W): $pF=2.17$ для влажности, соответствующей гравитационно-капиллярной влаги; $pF=2.17 + W$ – максимальная капиллярно-сорбционная



влажность (МКСВ), т.е. величина влажности, близкая к НВ; $pF=2.17 + 3W$ – максимальная молекулярная влагоемкость (ММВ), т.е. величина влажности, близкая к ВРК и $pF=5.20 + 3W$ – максимальная адсорбционная влагоемкость (МАВ). Содержание воды при этом потенциале соответствует трем молекулярным слоям воды, или равна трем монослоям воды по БЭТ. Соответственно, диапазон влажностей между влажностью давления входа воздуха и максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкостью (МКСВ) представляет собой по ведению текучую консистенцию, а диапазон влажностей между максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкостью (МКСВ) и максимальной молекулярной влагоемкостью (ММВ) – пластичную. При влажности менее ММВ консистенция изменяется на хрупко-пластичную, а затем и на хрупкую. Таковы основные положения теории «секущих», позволяющие по ОГХ определять консистенцию почвы, характеризовать её реологическое поведение.

Современная гидрология пошла несколько иным путём. Практическая гидрология потребовала от гидрофизиков, прежде всего, количественного формального описания ОГХ. Необходимо было найти формально некоторое уравнение, описывающее гладко и неразрывно эту кривую, причем чтобы описывающее уравнение достаточно хорошо дифференцировалось. Поэтому в данный момент ОГХ связывается, прежде всего, с аппроксимацией уравнением ван Генухтена (van Genuchten, 1980), хотя теоретические основы и физическое значение параметров уравнения весьма сомнительны. Физическая основа явлений и процессов была отодвинута в сторону в пользу быстрого нахождения параметров описания ОГХ и разнообразных, – предсказательных, оценочных, управляющих и других, – расчетов. Полагаем, этот подход, вряд ли активно поддерживался А.Д. Ворониным, для которого главенствующим было понимание физической сути явления, процесса, равновесного состояния. В этом, «физическом», виде теория «секущих» Воронина продолжает существовать в современной теоретической физике почв, в учебном процессе, в различных прикладных аспектах.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01056 А).

Литература

Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почв. М.: Наука, 1967. 584 с.

Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*1980. V. 44. pp. 892-898.



УДК 633.18: 631.41

АГРОГЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧВ РИСОВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ

Шеуджен А.Х.^{1,2}, Гуторова О.А.^{1,2}, Шейн Е.В.³, Романенков В.А.³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт риса, Краснодар,
Российская Федерация, ashad.sheudzhen@mail.ru

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская
Федерация

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская
Федерация

AGROGENIC SOIL EVOLUTION OF RICE AGROLANDSCAPES

Sheudzhen A.Kh., Gutorova O.A., Shane E.V., Romanenkov V.A.

¹All Russian Rice Research Institute, Krasnodar, Russian Federation, ashad.sheudzhen@mail.ru

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The transformation of soils of rice agrolandscapes under agrogenesis conditions is considered. Changes are associated with the removal of organic matter, carbonates, mineral elements, silt particles as components of the sustainable functioning of the soil of the irrigation system and can be a reflection of the processes of dehumification, forestization and leaching, expressed in time as in the permanent cultivation of rice and in crop rotation.

Введение

Технология возделывания риса обуславливает специфический водно-воздушный режим рисового поля, который приводит к преобразованию морфологического строения почвенного профиля, формированию иллювиального горизонта вследствие развития элювиально-глеевого процесса и изменению ряда физических и физико-химических свойств почв (Neue, 1988; Munir, 1995; Chacon et al. 2006; Huang, Thompson et al., 2015; Гуторова, Шеуджен, 2016). Если для черноземов, используемых в богарном земледелии, характерны в основном биогенно-аккумулятивные процессы, то в условиях затопления при выращивании риса, происходит развитие элювиальных и метаморфизационных процессов, главным образом оглеения и слитизации. Элювиально-глеевые процессы господствуют практически во всех почвах рисовых полей независимо от их генезиса (Майнашева, 2013).

Цель работы – проследить тренд временных изменений показателей плодородия лугово-черноземной почвы в условиях рисосеяния Кубани.

Объекты и методы

Исследования проведены на рисовой оросительной системе ЭСП ФГУ «Красное» Красноармейского района Краснодарского края. Объект – лугово-черноземная почва. Путем сопоставления материалов современного состояния лугово-черноземной почвы (2016 г.) с материалами почвенных исследований, полученных в 2004 г., был проведен анализ по изменению ее свойств, режимов и процессов во времени. В пределах рисовой оросительной системы, функционирующей с 1937 года, на одних и тех же участках с интервалом 12 лет были заложены почвенные разрезы:

Участок 1. Бессменный посев риса в течении 80 лет, без внесения удобрений (45°14'0.67", N 38°19'20.12", E).

Участок 2. Возделывание риса в севообороте согласно технологии, принятой в предприятии по рекомендациям ВНИИ риса (45°13'54.98", N; 38°19'10.92", E).



Участок 3. Залежь, расположенная на рисовой оросительной системе с момента ее эксплуатации и в рисовый севооборот не вовлекалась ($45^{\circ}14'0.63''$, N; $38^{\circ}19'36.28''$, E).

Морфологическое описание почвы проводили по Б.Г. Розанову (2004). Аналитическая часть исследования сопровождалась определением содержания подвижного фосфора и калия по Чирикову; общего гумуса методом Тюрина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову-Гриндель; водорастворимого гумуса перманганатным окислением; запаса гумуса на единицу площади с учетом плотности горизонтов; общего азота методом сухого озоления почвенных образцов (Vario EL III, Германия); карбонатов газоволюметрическим методом; поглощённых оснований в 1,0 н $\text{CH}_3\text{COONH}_4$; измерением $\text{pH}_{\text{вод.}}$ потенциометрическим методом; определением группового состава гумуса пирофосфатным методом по Кононовой-Бельчиковой; гранулометрического состава почвы методом пипетки с обработкой пирофосфатом натрия; плотности почвы ненарушенного сложения по Качинскому; общей пористости расчетным методом на основании плотности твердой фазы и плотности сложения (Новицкий и др., 2009; Орлова и др., 2007).

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования позволили выявить преобразования морфологических свойств лугово-черноземной почвы во времени. Особенно заметны эти изменения в условиях непрерывного использования почвы под бессменную культуру риса (80 лет). В обильном количестве обнаружены соединения железа в виде ржавых и охристых пятен, примазок, прожилок ржавчины. В окраске почвы проявляются сизоватый оттенок, угольно-черные пятна от сульфидных соединений. Почва с поверхности сильно уплотнена, особенно подпахотный горизонт, мощность которого на 3 см увеличилась в результате подвижности органических веществ. Ежегодное затопление рисового поля привело к разрушению зернисто-комковатой структуры верхних горизонтов с преимущественным образованием комковатых и глыбистых отдельностей. Отмечено смещение глубины вскипания от действия 10 %-ной HCl вниз по профилю почвы вследствие выщелачивания карбонатов.

Изменения морфологических признаков лугово-черноземной почвы обнаружены и в условиях рисового севооборота. Но они менее выражены по сравнению с бессменной культурой риса. Через 12 лет отмечено сильное уплотнение подпахотного горизонта, ухудшение почвенной структуры и увеличение его мощности (+ 4 см) вследствие вымывания органических веществ из пахотного слоя. Глубина вскипания от действия 10 %-ной HCl снизилась на 4 см, что указывало на выщелачивание карбонатов из пахотного горизонта.

За 12 лет пребывания залежи на рисовой оросительной системе в почве усилились признаки гидроморфизма, причем строение почвенного профиля не изменилось. В профиле, по сравнению с предыдущим периодом, обнаружено большее количество корневищ тростника, вокруг которых, в виде угольно-черных потеков, накапливались сульфидные соединения. При действии на них соляной кислотой выделялся сильный запах сероводорода.

Однако несмотря на указанные изменения лугово-черноземная почва сохранила основные морфологические черты, характерные для каждого участка (рис. 1).



Бессменный рис



Возделывание риса в севообороте



Залежь

Рис. 1. Профиль лугово-черноземной почвы рисовой оросительной системы (2016 г.).

Участки лугово-черноземной почвы разного пользования различаются по гранулометрическому составу. Тяжелосуглинистой разновидностью обладают участки, занятые под бессменным посевом риса и залежью с содержанием физической глины 56,60 и 58,60 % соответственно. Легкоглинистым гранулометрическим составом (68,73 %) характеризуется почва, используемая в рисовом севообороте. Такие различия обусловлены неоднородностью почвообразующих пород, представленных аллювиальными лёгкими глинами, средними и тяжелыми суглинками в условиях рисового севооборота, бессменного посева риса и залежи соответственно. Это определенным образом характеризует пестроту плодородия почв рисовой оросительной системы.

Выращивание риса бессменно с 1937 года без внесения удобрений сильно отразилось на гумусном состоянии лугово-чернозёмной почвы (табл. 1). В ней выражены процессы дегумификации – содержание гумуса снизилось на 0,61 % (или 23,43 т/га) на фоне его фульватизации $C_{гк}: C_{фк}=0,84$. Ежегодные его потери составили 0,05 % (1,95 т/га), содержание общего азота снизилось на 0,050 %, или в 1,5 раза при увеличении C: N с 12 до 15. Наибольшие изменения содержания гумуса отмечены в метровом слое почвы. При этом в 2 раза увеличился вынос водорастворимого гумуса из пахотного слоя в горизонт **AB₁**.

Бессменное возделывание риса способствовало обеднению почвы подвижным фосфором и калием. Почва через 12 лет из разряда низкой по обеспеченности фосфором стала очень низкой. Отмечено его вымывание из пахотного слоя и смещение зоны аккумуляции из горизонта **A_{пах}** в **AB₁**.



За 12 лет сократилось содержание илстых частиц в пахотном горизонте с 28,9 до 27,7 %, что связано с их выносом в нижележащие слои. С течением времени процессы лессивирования усилились.

Сумма обменных оснований сократилась на 8,4 % в результате снижения в почвенно-поглощающем комплексе долей катионов Ca^{2+} (с 69,8 до 63,3 %) и K^+ (с 2,8 до 2,3 %) на фоне увеличения доли Mg^{2+} с 23,3 до 29,2 % от суммы обменных оснований. Это отразилось на физическом состоянии почвы, обладающей большой плотностью сложения (1,59-1,66 г/см³) и чрезмерной низкой пористостью (40,1-41,1 %).

Реакция среды в системе горизонтов $\text{A}_{\text{пах}}+\text{AB}_1$ уменьшилась на 0,37 ед., в пахотном горизонте на 0,49 ед., а содержание карбонатов в $\text{A}_{\text{пах}}$ – в 1,8 раза. Вымыванию карбонатов подвержена верхняя часть почвы до глубины 73 см.

Таблица 1. Изменение физико-химических показателей лугово-черноземной почвы

| Угодье (горизонт) | Год | Гумус (%) | $\text{N}_{\text{общ}}$ (%) | $\text{pH}_{\text{вод}}$ (ед.) | CaCO_3 (%) | P_2O_5 (мг/100 г) | K_2O (мг/100 г) |
|---|------|-----------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Бессменный рис ($\text{A}_{\text{пах}}$) | 2004 | 2,88 | 0,139 | 6,55 | 0,44 | 2,77 | 20,20 |
| | 2016 | 2,27 | 0,089 | 6,06 | 0,25 | 1,90 | 17,22 |
| Возделывание риса в севообороте ($\text{A}_{\text{пах}}$) | 2004 | 3,12 | 0,227 | 6,84 | 0,38 | 3,73 | 24,40 |
| | 2016 | 3,04 | 0,210 | 6,39 | 0,29 | 3,53 | 22,86 |
| Залежь (A_d+A) | 2004 | 3,78 | 0,357 | 7,67 | 0,70 | 18,14 | 46,61 |
| | 2016 | 4,71 | 0,438 | 7,48 | 0,60 | 20,82 | 52,01 |

Аналогичная трансформация физических и физико-химических показателей плодородия лугово-черноземной почвы за тот же период, но значительно в меньшей степени, проявляется при возделывании риса в севообороте (табл. 1).

За 12 лет содержание ила уменьшилось в пахотном слое с 42,4 до 40,8 %, произошло уменьшение содержания общего гумуса на 0,08 %, общего азота – на 0,017 %, запасы гумуса снизились на 4,15 т/га, или ежегодно на 0,35 т/га, что в 5,5 раз меньше, чем при выращивании риса бессменно. Отношение С: N, равное 8, стабильное. С глубиной профиля содержание гумуса уменьшается, не затрагивая количественных изменений. Важно отметить проявившееся со временем вынос водорастворимого гумуса из пахотного в подпахотный горизонт. В составе гумуса уменьшилось количество гуминовых кислот и увеличилось содержание фульвокислот в небольшом диапазоне изменения их отношения от 1,97 до 1,87.

Содержание подвижного фосфора и калия в пахотном горизонте заметно снизилось, но значительно в меньшей степени, чем при бессменном посеве риса. Зона аккумуляции подвижного фосфора отмечена в горизонте AB .

В почвенно-поглощающем комплексе более заметные изменения отмечены в подпахотном горизонте, где снизилась доля Ca^{2+} с 76,0 до 72,0 % и увеличилась доля Mg^{2+} с 18,0 до 21,0 % от суммы обменных оснований. Ухудшились физические показатели этого горизонта – увеличилась плотность сложения с 1,34 до 1,41 г/см³ и снизилась его пористость с 50,7 до 48,9 %. Реакция среды в $\text{A}_{\text{пах}}$ уменьшилась на 0,45 ед. вследствие вымывания карбонатов.

На участке залежи вниз по профилю почвы содержание илстых частиц уменьшается и с течением времени не изменяется. Через 12 лет количество общего и водорастворимого гумуса, а также общего азота, подвижных форм фосфора и калия в почве залежи увеличилось вследствие разложения растительных остатков, поверхность которой плотно ими задержана (табл. 1).



Отношения $C_{гк}: C_{фк}=2,65-2,76$ и $C:N=6$ слабо изменяются за исследуемый период. Величина рН уменьшилась на 0,19 ед., незначительные изменения произошли в почвенно-поглощающем комплексе. Снижение карбонатов отмечено в верхнем 0-30 см слое.

Выводы

Ухудшение физического состояния лугово-черноземной почвы на участке бессменного посева риса, а именно высокая плотность пахотного и подпахотного горизонтов и, соответственно, чрезмерно низкая их пористость по сравнению с севооборотным полем, в условиях которого подпахотный горизонт также сильно уплотнился, является одним из прогрессирующим фактором во времени. Диагностированные изменения обусловлены выносом органических веществ, карбонатов, минеральных элементов, илестых частиц как компонентов устойчивого функционирования почв оросительной системы и могут являться отражением процессов дегумификации, лессивирования, выщелачивания, выраженных во времени как при бессменном возделывании риса, так и в условиях севооборота.

Литература

- Гуторова О.А., Шеуджен А.Х. (2016) Морфогенетические особенности рисовой лугово-черноземной почвы. *Российская сельскохозяйственная наука*, **4**, 53-56.
- Майнашева Г.М. (2013) Экологические проблемы черноземов, используемых под культуру риса. *Экологическое равновесие: Антропогенные изменения географической оболочки Земли, охрана природы*, 116-120.
- Новицкий М.В., Донских И.Н., Чернов Д.В. и [др.] (2009) Лабораторно-практические занятия по почвоведению: учебное пособие. СПб.: Проспект науки, 320.
- Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Орлова Е.Е. (2007) Методы изучения содержания и состава гумуса. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 145.
- Розанов Б.Г. (2004) Морфология почв. М.: Академический Проект, 432.
- Chacon N., Silver W.L., Dubinsky E.A., Cusack D.F. (2006) Iron reduction and soil phosphorus solubilization in humid tropical forest soils: the roles of labile carbon pools and an electron shuttle compound. *Biogeochemistry*, **78**, 67-84.
- Huang, L.-M., Thompson A., Zhang G.-L., Chen L.-M., Han G.-Z., Gong Z.-T. (2015) The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: a review. *Geoderma*, **237-238**, 199-210.
- Munir M. (1995) Effects of paddy soil cultivation on changes in the soil morphology. *Agrivita*, **V. 18, 1**, 1-6.
- Neue H.U. (1988) Management of physical properties of soils. *Fifth International Soil Management Workshop on Classification and management of Rice-Growing Soils*. Taiwan, Roc., December 11-23, 1988.



СЕКЦИЯ 1. ФИЗИКА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПОЧВ



RELATIONSHIP BETWEEN MINERALOGICAL AND SOME PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS DEVELOPED ON BASALTIC PARENT MATERIAL ON DIFFERENT SLOPE POSITION

Orhan DENGİZ¹

¹ Department of Soil Science and Plant Nutrition, Agricultural Faculty, Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkey.

e-mail: odengiz@omu.edu.tr

Abstract: The aim of this study is to evaluate the effect of the different slope positions on chemical weathering, physical and mineralogical properties in soils formed on basaltic parent material under sub-humid terrestrial ecosystem in Black Sea region of Turkey using pedological, geochemical and mineralogical data obtained from X-ray diffraction and Scanning Electron Microscope analysis. For this aim, three representative profiles formed on different slope positions of transect were searched, described and classified according to Soil Survey Staff (2014)/IUSS Working Group WRB (2015) classification systems. These are Vertic Haplustept/Calcic Cambisol, Lithic Ustorthent/Eutric Regosol and Typic Haplustept/Haplic Cambisol. The results clearly showed that topography strongly influences soil physical, mineralogical and morphological characteristics either directly or indirectly in the local region even soils formed on the same parent material with the same climatic condition. This case was also explained with chemical weathering indices (CIA, CIW and WIP) in this study.

Keywords: Slope position, weathering indices, soil formation, clay minerals

Introduction

Soil characteristics change in temporal and spatial directions and such variations results from complex interactions among environmental condition or state factors such as the parent material, the climate, the topography, the age of the soil and the role of organisms. Particularly, it has long been recognized that parent material and topographic position has a major influence on the mineralogical, morphological, physical and chemical properties of soils in local condition (Dengiz and Şenol 2018). In addition, Tunçay and Dengiz (2016) reported in their study carried out in Bafra Plain topographic conditions strongly affect soil pedogenic process either directly or indirectly in the local region. For most pedological purpose, including the modeling of soil characteristics and variation, the most important feature of the parent material is considered its chemical composition. Physical properties such as texture or grain size are considered only secondary importance. Moreover, mineral weathering, fundamental part of pedological evaluation, also provides an essential role by transforming bedrock to weathered rock and consequently to soil that supply nutrients to ecosystems (Lybrand and Rasmussen 2018). Therefore, it is important to understand how a soil is formed from bedrock and to examine how chemical or physical weathering influences the geochemical evolution of soils. As basalts locate a large part of the earth surface weathering, basalt formed by the solidification of molten materials that originated within the earth is important soil material global weathering and carbon cycling which covered a large part of the earth surface (Heckman & Rasmussen 2011). The aim of this study is to evaluate the effect of the different slope positions on chemical weathering, physical and mineralogical properties in soils formed on basaltic parent material under sub-humid terrestrial ecosystem in Black Sea region of Turkey using pedological.

Materials and method

The study was conducted throughout a transverse section between Bafra Plain and Canik Mountain located around 20 km west of Samsun Province in the central Black Sea region of Turkey, where is situated at coordinates 4597065 N – 253437 E and 4595005 N – 251693 E (UTM-36N/WGS84, m). The study area extended from 10 m to 300 m a.m.s.l and contains three various



landscape features (Flat on hill, shoulder and lowland plateau,) that represent the changes in geomorphology, topographical gradient, parent material and soil characteristics on crosswise from North to South direction. The underlying bedrock is primarily made up of quaternary basaltic colluvial deposits on lowland plateau, and Mesozoic basalt flat on hill and lowland plateau, respectively. The region is under semi-humid climate conditions and the mean annual temperature and precipitation are 13.6 °C and 764.3 mm. The morphological features of the 3 profiles in the field were determined, followed by sample collection using genetic horizons and classification in compliance with the Soil Survey Staff (2014). pH, EC, CaCO₃ content, particle-size distribution bulk density and hydraulic conductivity was determined according to (Soil Survey Staff 1992). The moisture contents of the undisturbed soil cores at pressures of 0, 1, 2, 5, 10, 33, 50, 100, 500, and 1500 kPa were determined (Klute 1986). The minerals were determined using the diagnostic XRD graphs (Whittig & Allardice 1986). In this study, the following weathering indices were used to quantify the weathering rates of the profiles:

- a. Chemical Index of Alteration (CIA) (Nesbitt & Young 1982):

$$CIA = (100) [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$$
- b. Chemical Index of Weathering (CIW) (Harnois 1988):

$$CIW = (100) [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]$$

Results and discussions

Soil physico-chemical characteristics showed changeability stem from dynamic interactions among natural environmental parameters such as climate, parent material, erosion and topography (Dengiz et al 2006). Table 1 shows the results of the physico-chemical soil analyses of PI, PII and PIII designated on the southwest-northeast section. All has slightly alkaline reaction except for surface horizon of PII and changed EC values between 0.11 and 0.55 dSm⁻¹. In addition, all profiles have slightly soluble with no significant differences among pedons. CaCO₃ content was close to the detection limit in all profiles, especially in surface horizons, and ranged from to 0.09 to 1.08%. Moreover, the calcium carbonate content was found even much higher in the Ck horizon of Vertic Haplustept (PI) with carbonate accumulation (i.e. calcic horizons). There are several reasons about lime in basaltic rock one of them is minerals in basalt, which include Ca, form CaCO₃ in the appropriate environment. Among the physical soil properties, the differences between the bulk density, void ratio, porosity, and water-resistant aggregate weight of the soil horizons were determined statistically significant (P<0.01).

Table 1. Some physico-chemical properties of the soils

| Horizon | pH | EC | CaCO ₃ | OM | Clay | Silty | Sand | BD | VR | P |
|--|------|------|-------------------|------|------|-------|------|--------|--------|---------|
| PI- Flat on hill (Vertic Haplustept / Calcic Cambisol) / Pasture / 251 m | | | | | | | | | | |
| A | 7.14 | 0.55 | 0.69 | 3.53 | 61.9 | 23.6 | 14.5 | 1.56bc | 0.70de | 41.20bc |
| Bw1 | 7.70 | 0.54 | 0.98 | 1.78 | 49.9 | 27.7 | 12.5 | 1.50e | 0.76b | 43.24ab |
| Bw2 | 7.92 | 0.11 | 0.98 | 1.41 | 47.9 | 32.3 | 19.8 | 1.66a | 0.60g | 37.46d |
| 2Ck | 7.94 | 0.38 | 6.37 | 1.29 | 40.0 | 40.8 | 19.1 | - | - | - |
| PII- Shoulder (Lithic Ustorthent / Eutric Regosol) / Degraded Forest / 190 m | | | | | | | | | | |
| A | 6,74 | 0.35 | 0.09 | 1.54 | 22.0 | 21.8 | 56.2 | 1.56bc | 0.70de | 41.25bc |
| Cr | 7.01 | 0.20 | 0.29 | 0.87 | 14.6 | 9.3 | 76.1 | - | - | - |
| PIII- Low land plateau (Typic Haplustept / Haplic Cambisol) / Forest / 160 m | | | | | | | | | | |
| A | 7.06 | 0.44 | 1.08 | 1.88 | 54.4 | 22.6 | 23.1 | 1.54cd | 0.72cd | 42.01bc |
| Bw | 7.31 | 0.42 | 1.02 | 0.06 | 61.1 | 17.7 | 21.2 | 1.60a | 0.68f | 35.24cd |
| Cr | 7.01 | 0.51 | 0.39 | 0.57 | 57.5 | 22.6 | 19.9 | - | - | - |



OM: Organic Matter, C: Clay; CL: Clay Loamy; BD: Bulk Density, VR: Void Ratio; P: Porosity; WRAS: Water Resistance Aggregate Stability; *: The values showed dark colour indicates the highest and lowest values. The difference between the averages showed the same letter is not significant according to the Duncan test at the 0.05 level.

The changes in the moisture content among the soil horizons at different matric potentials (0, 1, 2, 5, 10, 33, 100, 500 and 1500 kPa) were found as statistically significant ($P < 0.01$) (Table 2). When the changes in moisture at different matric potentials (0, 1, 2, 5, 10, 33, 100, 500 and 1500 kPa) are evaluated together, the Bw1 and A horizons in the PI and PIII profiles had the highest moisture content, and its moisture exchange with the other soil horizons was statistically significant ($P < 0.01$). However, at certain matric potentials (0, 1, 2 and 100 kPa), the Bw1 and Bw2 horizons in the PI had the highest moisture content, and their moisture contents at these matric potentials were statistically the same for each other. Among all matric potentials, the lowest moisture content was determined in the Bw2 horizon of PI.

Table 2. The water retention of the soil horizons of the profiles

| Horizon | 0 kPa | 1 kPa | 2 kPa | 5 kPa | 10 kPa | 33 kPa | 100 kPa | 500 kPa | 1500kPa |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| EF-1- PI- Flat on hill (Vertic Haplustept / Calcic Cambisol) / Pasture / 251 m | | | | | | | | | |
| A | 36.44de | 34.55de | 34.22cd | 33.90abc | 33.85abc | 33.37abc | 31.79ab | 29.68abc | 28.95a |
| Bw1 | 39.25bcd | 36.44abc | 36.17abc | 35.51ab | 35.15ab | 34.72ab | 33.99a | 31.21a | 28.69a |
| Bw2 | 30.00g | 27.22f | 25.22f | 24.60e | 24.09g | 23.78f | 22.61d | 21.68d | 19.88c |
| 2Ck | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| EF-2 PII- Shoulder (Lithic Ustorthent / Eutric Regosol) / Degraded Forest / 190 m | | | | | | | | | |
| A | 33.08f | 28.72f | 28.55e | 27.97d | 27.33f | 26.69ef | 14.54e | 12.87e | 11.83d |
| Cr | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| EF-3 PIII- Low land plateau (Typic Haplustept / Haplic Cambisol) / Forest / 160 m | | | | | | | | | |
| A | 41.16abc | 36.81abc | 36.69abc | 35.68ab | 35.21ab | 34.32abc | 31.27abc | 27.88bc | 28.44ab |
| Bw | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Cr | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

*: The values showed dark colour indicates the highest and lowest values. The difference between the averages showed the same letter is not significant according to the Duncan test at the 0.05 level.

According to XRD analysis, the profiles on the south-north direction reveal that, especially the soils formed on Profiles I and PIII located on low slope degree, smectite was dominant, followed by illite, kaolinite and then vermiculite whereas, Lithic Ustorthent (PII) formed on high slope degree, mainly contained illite, followed by kaolinite and a low amount of smectite clays. In addition, Table 3 shows weathering rates derived from the geochemical properties of the profiles in the southwest–northeast direction. CIA values are divided into five groups: very slightly weathered (50 to 60), slightly weathered (60 to 70), moderately weathered (70 to 80), highly weathered (80 to 90) and extremely weathered (90 to 100). Although the CIA values of the profiles on the high slope lands were in the very slightly weathered class, the CIA values of other profiles were either in the slightly weathered or moderately weathered class. The CIW value of unweathered rock is 50 and reaches 100 in intensely weathered environments, and the CIW rate increases with increasing weathering. As with the case for CIA values, CIW values differed significantly and ranged from 13.1 to 80.1. The highest CIW values of the soils were determined in the PI (Vertic Haplustept), and the distribution pattern of the CIW in the profile was similar to that of the CIA. The CIW values of the PII were in the same class with CIA due to erosion process leading to the prevention of the soil formation.



Table 3. The weathering indices for the profiles

| Horizon | Depth (cm) | CIA | CIW |
|--|------------|------|------|
| EF-1- PI- Flat on hill (Vertic Haplustept / Calcic Cambisol) / Pasture / 251 m | | | |
| A | 0-12 | 63.0 | 71.0 |
| Bw1 | 12-41 | 68.6 | 77.0 |
| Bw2 | 41-84 | 71.9 | 80.1 |
| 2Ck | 84-105 | 12.9 | 13.1 |
| EF-2- PII- Shoulder (Lithic Ustorthent / Eutric Regosol) / Degraded Forest / 190 m | | | |
| A | 0-11 | 52.1 | 58.0 |
| Cr | 11-65 | 71.9 | 80.0 |
| EF-3- PIII- Low land plateau (Typic Haplustept / Haplic Cambisol) / Forest / 160 m | | | |
| A | 0-18 | 63.5 | 74.7 |
| Bw | 18-57 | 69.1 | 79.0 |
| Cr | 57-87 | 64.8 | 76.9 |

CIA: Chemical Index of Alteration, CIW: Chemical Index of Weathering,

Conclusion

In this present research, it was determined that the main limitation soil forming factor on profile development in hillslope positions (shoulder) where covered by weak vegetation is soil erosion. Therefore, soils can be described as young soil. On the other hand, soils in lower slope position have development subsurface horizon due to high clay content (generally smectite) and no interruption events. Main subsurface diagnostic horizon of these soils is cambic (Bw horizon). This case also explained with chemical weathering indices such as CIA, CIW and investigated matric potentials which related with clay minerals. Consequently, the results clearly showed that topographic condition strongly effects on soil physical, mineralogical and morphological characteristics either directly or indirectly in the local region even soils formed on the same parent material and under the same climatic condition.

Acknowledgment

The authors would like to thank the TUBITAK (Scientific and Technological Research Council of Turkey, project no: TOVAG 213O073) which provided support for this project.

Reference

- Dengiz, O. and Şenol, H (2018) Effect of toposequences on geochemical mass balance and clay mineral formation in soils developed on basalt parent material under subhumid climate condition. *Indian Journal of Geo Marine Science*, 47, 1809-1820
- Dixon J.L, Heimsath A.M & Amundson R (2009) The critical role of climate and saprolite weathering in landscape evolution. *Earth Surface Processes Landforms*, 34, 1507–1521.
- Heckman K & Rasmussen C (2011). Lithologic controls on regolith weathering and mass flux in forested ecosystems of the south western USA. *Geoderma*, 164: 99–111.
- Harnois, L. 1988. The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering, *Sedimentary Geology*, 55, 319-322.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M (1982). “Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites”, *Nature*, 299, 715-717.
- Lybrand R A & Rasmussen C. (2018). Climate, topography, and dust influences on the mineral and geochemical evaluation of granitic soils in southern Arizona, *Geoderma*, 314, 245-261.



UDC 631.437

ELECTRICAL RESISTIVITY: UNIVERSAL AND FUNDAMENTAL SOIL PROPERTY

Golovko L.A.¹, Pozdnyakova A.D.², Pozdnyakov L.A.^{3,2}

¹Landviser LLC, Houston, TX, USA

info@landviser.net

²All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands, Tver, Russian Federation

antdanpozd@gmail.com

³Faculty of Soil Science of MSU, Moscow, Russian Federation

apl-223@mail.ru

Annotation: Electrical resistivity is a fundamental soil property directly related with the density of mobile of electrical charges. Unlike other soil properties, electrical resistivity can be easily, repeatedly, and reliably measured in situ and in laboratory with various geophysical methods; therefore, is a universal soil characteristic useful for mapping and monitoring.

Introduction

Soil properties are of high importance in many human activities, such as agriculture, forestry, landscaping, environmental protection, recreation, and civil engineering. Soil survey for different applications requires quick and, when possible, non-disturbing estimations of numerous soil properties, such as salinity, texture, stone content, groundwater depth, and horizon sequence in soil profiles. Many of these properties are highly spatially variable yet some are also temporally unstable. An accurate evaluation of soil properties is complicated by the nature of their variability; however, conducting soil measurements with a high sampling density is costly and time-consuming. Conventional methods of soil analysis mostly require disturbing soil, removing soil samples, and analysing them in a laboratory.

Electrical resistivity is a fundamental property of a material and a parameter of an artificially created electrical fields. It is directly related with the density and mobility of electrical charges. Regardless of the considered scale and the nature of electrical charges in soils, basic laws of electromagnetism, i.e. Maxwell, Poisson, and Boltzmann laws, are applicable to describe formation and distribution of electrical fields in soils. Distribution of mobile electrical charges in soil is influenced by other “non-electrical” soil properties: water content, bulk density, CEC, humus content, structure of soil profile and spatial variability of landscape. Unlike other soil properties, electrical resistivity of soil can be easily, repeatedly, and reliably measured in situ and in laboratory experiments with various geophysical methods making it a universal soil characteristic useful for soil mapping and monitoring.

Electrical geophysical methods allow rapid measurement of soil electrical resistivity directly from soil surface to any depth without soil disturbance. The in-situ methods of electrical conductivity (e.g. four-electrode probe and electromagnetic induction) are routinely used to evaluate soil salinity, map groundwater tables; to outline locations of landfills; and to evaluate water content, temperature, texture, and structure of soils. However, the relationships between electrical properties and other soil chemical and physical properties are very complex because many soil properties may simultaneously influence in-situ measured electrical parameters (Pozdnyakova 1999; Pozdnyakov and Pozdnyakova 2002).



Theory of electrical resistivity

Electrical resistivity (ER) of a material is defined as follows:

$$ER = \frac{A\Delta\varphi}{LI}, \text{ where } L \text{ is the length of a uniform conductor with a cross-sectional area } A.$$

Electrical resistivity is usually expressed in ohmmeters.

Geophysical equipment

The resistivity survey method is more than 100 years old and is one of the most commonly used geophysical exploration methods. It has been used to image targets from the millimeter scale to structures with dimensions of kilometers (Pozdnyakov et al. 2009; Chernov 2010). It is widely used in agricultural, archaeological, environmental, engineering, and mineral exploration surveys (Loke, Chambers, and Kuras 2011).

Direct current EC methods utilize well-known four-electrode principle to measure electrical resistivity or conductivity, as shown in the Figure 1. DC resistivity equipment, f.e. LandMapper (Golovko, Pozdnyakov, and Pozdnyakova 2010), measures potential difference ($\Delta\varphi$), which arises between two electrodes (M and N), when electrical current (I) is applied to other two electrodes (A and B). A/L is a geometrical coefficient (K), which is easily calculated for different in-situ electrode arrangements and laboratory conductivity cells.

Methods of field soil electro-physics include direct current (DC) and auxiliary current (AC) methods. Parameters of stationary electrical fields are measured by contact (DC) methods. Predominantly in soil studies electrical conductivity or resistivity is measured by DC methods of four-electrode probe such as EC-mapping and vertical electrical sounding (VES).

Soil ER is of interest in soil studies for several reasons. First, newly developed technologies allow obtaining fast, dense, and accurate GIS-compatible soil ER measurements (Golovko, Pozdnyakov, and Pozdnyakova 2010).

Second, soil ER is related to several soil properties important for plant growth, including: soil salinity; level of soil compaction; depth to clay pan or groundwater; gravel layers or lenses, sand, silt, and clay contents; soil drainage; total soil organic matter content; NPK contents; soil pH, cation exchange capacity, etc.

Third, modern technologies usually can measure ER in subsoil at a range of depths essential for plant growth. This feature adds to the unique importance of soil ER for site-specific management, because neither digital elevation models nor remote sensing can assess the subsurface soil properties. Generally, the EC equipment measures a bulk electrical conductivity or resistivity in a relatively large volume of soil (on average 0.5 m^3) removing the bias of point soil sampling by augers, etc. and can better characterize mid-scale (within field) soil variability, which is the most important factor in the delineation of management zones for precision agriculture practices (Larisa Golovko and Anatoly I. Pozdnyakov 2007).

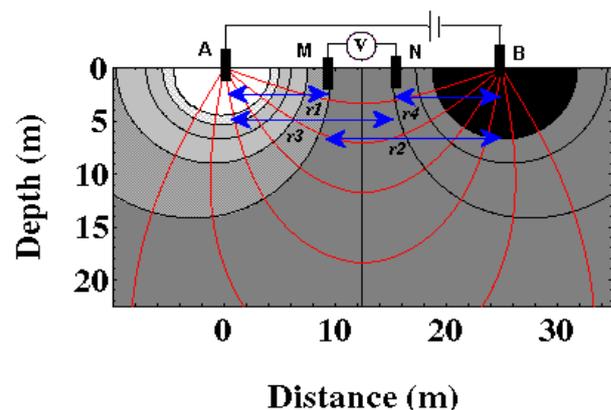


Fig. 1. Illustration of typical four-electrode array used in resistivity mapping



Finally, on-the-go EC sensors measure soil electrical conductivity non-destructively *in-situ* providing more accurate assessment of the real conditions in soil, which makes them particularly suitable for soil monitoring and time-series statistical studies of the anthropogenic changes in cultivated soils (Pozdnyakov et al. 2009; Pozdnyakov 2008).

Soil electrical resistivity

Soil is a heterogeneous medium consisted of liquid, solid, and gaseous phases. The solid and liquid phases play an essential role in soil spontaneous electrical phenomena and in behaviour of electrical fields, artificially created in soil. Soil air can be considered as a dielectric. Regardless of the considered scale and the nature of electrical charges in soils, basic laws of electromagnetism, i.e. Maxwell, Poisson, and Boltzmann laws, are applicable to describe formation and distribution of electrical fields in soils.

Soil properties influencing the density of mobile electrical charges were found to be exponentially related with electrical resistivity and potential based on Boltzmann's law of statistical thermodynamics. Relationships were developed between electrical properties and other soil physical and chemical properties, such as texture, stone content, bulk density, water content, cation exchange capacity, salinity, humus content, and base saturation measured *in-situ* and in soil samples (Pozdnyakov, Pozdnyakova, and Pozdnyakova 1996; Pozdnyakov 2001).

By merging electromagnetic theories with pedogenesis we can identify the soil properties directly or indirectly related to the soil electrical conductivity. Soil electrical charge is determined by an ion exchange, which in turn depends on three factors:

- Isomorphic substitutions in clay minerals;
- Breakage of ionic bonds in organo-mineral complexes;
- and alteration of charge distribution in macromolecules of soil organic matter.

Therefore, soil chemical properties, such as humus content, base saturation, cation exchange capacity (CEC), soil mineral composition, and the amount of soluble salts, are related to the total amount of available charges in soils. Soil physical properties, such as water content and temperature, influence the mobility of electrical charges in soils. Other soil physical properties, such as soil structure, texture, organic matter, and bulk density, alter the distribution of mobile electrical charges in soils and, therefore are related with electrical resistivity (Kondrashkin et al. 2011).

Soil electrical resistivity vs water content

From our study of electrical resistivity vs. soil water content relationships in laboratory conditions, the mobility of electrical charges exponentially increases with an increase in water content (Pozdnyakov, Pozdnyakova, and Karpachevskii 2006). However, the general exponential relationship can be further subdivided into several exponential relationships corresponding to categories of soil water according to Voronin's concept (Fig. 2). The contribution of molecular attraction to the soil matrix potential increases with increasing water content from air-dry to water-saturated soil, because the contribution of capillary forces increases. Voronin showed that the nature and magnitude of the forces contributing to the soil

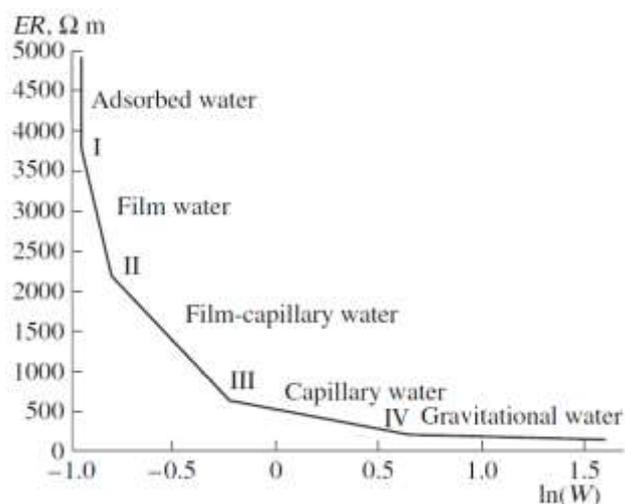


Fig. 2. A piecewise-linear relationship between the natural logarithm of water content and electrical resistivity.



matrix potential change abruptly at some specific conditions separating the different ranges of soil water such as adsorbed, film, film-capillary, capillary, and gravitational water.

Evaluating soil genesis, anisotropy and bioactivity

Soil genesis

Electrical parameters of soils include the natural electrical potentials and the electrical resistivity, which is determined by the density of the mobile electric charges. The latter, in turn, are determined by the properties characterizing the sorption and diffusion properties of soil morphons, horizons, and profiles and the genetic soil types and depend on external factors (the landscape type, the soil geochemical province, and the climatic zone). Almost every specific soil-forming process that results in the accumulation or leaching of substances and compounds in the profile of any genetic soil type affects the electrical parameters, so that their values and changes in the profile will characterize the organization and degree of differentiation of the soil profile.

Equal or similar values of the electrical parameters are observed in different types of soils, where various elementary soil processes (e.g. salt accumulation, peat accumulation, podzolization, and leaching of the upper horizons) occur. These facts should be considered as an advantage of electrophysical methods rather than a disadvantage, because electrophysical methods can be used to study in detail any soils and solve a wide range of scientific and practical problems by measuring the electrical parameters in a specific soil zone when at least general information is available on the soil situation in the region studied (Pozdnyakov 2008).

Anisotropy

A lot of soil properties exhibit differences when measured in different directions (anisotropy). Paper by Pozdnyakov et al. 2009 examines such anisotropy in horizons and profiles of anthropogenically transformed soils of podzolic type - light typical texture-differentiated agrozems, agrosoddy deeply podzolic and agrosoddy shallow-podzolic soils. The highest anisotropy is typical of the field water content, bulk density, and total porosity. The coefficients of anisotropy (gradients) calculated for the separate horizons as the ratios between the values of the properties measured in the horizontal and vertical directions ($k = P_{horiz}/P_{vertic}$) of these properties are much higher than those of other soil properties. The coefficient of anisotropy of the soil profile (K) is suggested as the coefficient of correlation between the values of a given property determined in the horizontal and vertical soil sections. For the considered properties, K varies from 0.4 to 0.6. For other soils properties, such as the solid phase density, the electrical resistivity determined in a laboratory and in the field, and the organic carbon content, the coefficients of anisotropy are close to 1.0; thus, those properties could be considered isotropic. The clay content has an intermediate anisotropy.

Soil biological activity

Soil electrical resistivity is a fundamental property describing many other inter-related physical and chemical properties. In Pozdnyakov 2008 the parameters of the potential biological activity (respiration, methanogenesis, nitrogen fixation, and denitrification) of drained peat soils were analyzed as depending on their morphological, chemical, and electrical properties. A high positive correlation was found between the potential respiration of the soil and its electrical resistivity, because these parameters depended on the same soil properties: the ash content, the cation exchange capacity, etc.



Conclusions

Multitude of studies of soil electrical resistivity in situ and in the lab prove that soil properties influencing the density of mobile electrical charges were found to be exponentially related with electrical resistivity based on Boltzmann's law of statistical thermodynamics.

Acknowledgment

LandMapper and other geophysical equipment used to measure soil electrical resistivity in different studies referenced in this paper is available through Landviser, LLC (www.landviser.com).

References

- Chernov, V. (2010) "Modern Search of Oil Fields and Gas a Method of High Resolution Electroinvestigation in Russia." In . <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402765>.
- Golovko, L. and A.I. Pozdnyakov (2007) "Electrical Geophysical Methods in Agriculture." In *Progress of Information Technology in Agriculture*, edited by Chunjiang Zhao, 457–71. Beijing, China: China National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture NERCITA. <http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-NXXH200710001084.htm>.
- Golovko, L., A.I. Pozdnyakov, and A.D. Pozdnyakova (2010) "LandMapper ERM-02: Handheld Meter for Near-Surface Electrical Geophysical Surveys." *FastTIMES (EEGS)* 15 (4-Agriculture: A Budding Field in Geophysics): 85–93.
- Kondrashkin, B. E., A. I. Pozdnyakov, V. P. Samsonova, and M. I. Kondrashkina (2011) "Electrical Resistivity of Arable Gray Forest Soils." *Moscow University Soil Science Bulletin* 66 (2): 75–78. <https://doi.org/10.3103/S0147687411020050>.
- Loke, M.H., J.E. Chambers, and O. Kuras (2011) "Instrumentation, Electrical Resistivity." In *Solid Earth Geophysics Encyclopedia (2nd Edition), Electrical & Electromagnetic*, Gupta, Harsh (Ed), 2nd ed., 599–604. Berlin: Springer.
- Pozdnyakov, A. I. (2008) "Electrical Parameters of Soils and Pedogenesis." *Eurasian Soil Science* 41 (10): 1050–58. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100062>.
- Pozdnyakov, A. I., L. A. Pozdnyakova, and L. O. Karpachevskii (2006) "Relationship between Water Tension and Electrical Resistivity in Soils." *Eurasian Soil Science* 39 (S1): 578–83. <https://doi.org/10.1134/S1064229306130138>.
- Pozdnyakov, A. I., A. V. Rusakov, S. M. Shalaginova, and A. D. Pozdnyakova (2009) "Anisotropy of the Properties of Some Anthropogenically Transformed Soils of Podzolic Type." *Eurasian Soil Science* 42 (11): 1218–28. <https://doi.org/10.1134/S1064229309110039>.
- Pozdnyakov, A.I. (2001) *Полевая электрофизика почв (Field soil electrophysics)*. Moscow, Russia: MAIK "Nauka-Interpereodika." http://www.landviser.net/webfm_send/238.
- Pozdnyakov, A.I., L.A. Pozdnyakova, and A.D. Pozdnyakova (1996). *Стационарные Электрические Поля в Почвах (Stationary Electrical Fields in Soils) -In Russian, with English Conclusions-*. Moscow, Russia.: KMK Scientific Press,.
- Pozdnyakov, A.I. and L.A. Pozdnyakova (2002) "Electrical Fields and Soil Properties." In *17 World Congress of Soil Science, Symp. 53:Paper #1558*. Bangkok, Thailand. http://www.landviser.net/webfm_send/1.
- Pozdnyakov, L. A. (2008) "Estimation of the Biological Activity of Peat Soils from the Specific Electrical Resistance." *Eurasian Soil Science* 41 (10): 1077–82. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100098>.
- Pozdnyakova, L.A. (1999) "Electrical Properties of Soils." Ph.D. Thesis, Laramie, WY: University of Wyoming. http://www.landviser.net/webfm_send/6.



EFFECT OF LIME CONTENT ON SOIL MECHANICAL PROPERTIES

Gülser C.^{1*}, Dengiz O.¹, Kızılkaya R.^{1,2}

¹Faculty of Agriculture, Soil Science & Plant Nutrition Department of OMU, Samsun, Turkey

²AGROBİGEN Research & Development Trade Ltd.Co, Samsun Technopark, Samsun, Turkey

*cgulser@omu.edu.tr

Abstract. In this study effect of lime (CaCO_3) content on Atterberg limits of 40 different surface soil samples was determined. While clay contents of the samples ranged between 14.5% and 78.0% with a mean of 48.5%, CaCO_3 contents varied between 0.6% and 48.4% with a mean of 14.84%. The mean values of liquid limit (LL), plastic limit (PL) and plasticity index (PI) were determined as 52.96%, 28.38% and 24.58%, respectively. CaCO_3 content gave significant negative correlation with LL (-0.514**), PL (-0.570**) and PI (-0.412**). Most of the soil samples (45%) classified in high plasticity clay class had lower mean CaCO_3 content (8.4%) than the soil samples classified in low plasticity clays including 26.3% CaCO_3 . Increasing lime content in clay soils reduces Atterberg limits and plastic properties of clay soils due to dilution effect of lime fractions on soil texture. Keywords: Atterberg limits, clay soil, CaCO_3 , plasticity.

Introduction

Soil mechanics defines the behavior of soils under mechanical forces. In general terms, soil mechanics is the balance and movement science of the earth body (Verruijt, 2011). The consistency limits used for the classification of fine-grained soils are defined as shrinkage limit, plastic limit and liquid limit by Atterberg (1911). Atterberg limits are empirical values and developed for engineering purposes. Evaluations of soil engineering properties can be useful to people interested in planning, construction and maintenance projects, along with agricultural soil management (Gülser and Candemir, 2004). Shrinkage limit is the boundary between solid and semi-solid states, the plastic limit is the boundary between the semi-solid and plastic states and the liquid limit is expressed as the boundary between the liquid state and the plastic state (Casagrande, 1932; Archer, 1975; Campbell, 2001; Das, 2006; McBride, 2008). Smith et al. (1985) determined the strong correlations between mechanical properties and the pedological characteristics reflecting clay mineralogy, texture, cation exchange capacity and specific surface area of soils. Gülser and Candemir, (2004), in their studies to reveal the possible changes in the consistency limits of organic matter added to soils, determined a positive relationship between soil organic matter and consistency limits between LL and PL. Kirchof (2002) determined that divalent cations tend to increase Atterberg limits of soils due to their position in the lyotropic series. However, Atanur (1973) found that plastic limit of montmorillonit clay increased with the type of cations. Ogila (2014) found a reduction in the swelling characteristics of high expansive soil when the limestone dust was mixed with the soil. The objective of this study was to determine the effect of soil lime (CaCO_3) content on Atterberg limits.

Objects and methods

Surface soil samples were taken from 0 to 20 cm depth of the 40 different fields. Particle size distribution of the soil samples were determined by hydrometer method (Day, 1965). Soil reaction (pH) was determined in the 1:1 (w:v) soil water suspension by pH meter, electrical conductivity ($\text{EC}_{25^\circ\text{C}}$) in the same soil suspension by EC meter (Jackson, 1962). The lime content (CaCO_3) was measured by Scheibler Calcimeter method (Nelson, 1982). Liquid limit, plastic limit and plasticity index values of the soil samples were determined according to Black (1965). Correlations between the Atterberg limits and the soil properties were estimated using the SPSS programme.



Results and discussion

The results of descriptive statistics of the some soil properties and Atterberg limits are given in Table 1. Clay content of the soil samples varied between 14.5 and 78.0% with a mean of 48.5%. The most of soil samples had clay texture class. Soil reactions (pH) of the samples generally were slightly alkaline and varied between 6.6 and 8.6 with a mean of 7.82. According to the EC values, the soil samples were non saline. Lime (CaCO_3) contents of the samples varied between 0.6% and 48.4% with a mean of 14.84%.

Table 1. Descriptive statistic of the soil properties and Atterberg limits.

| | Minimum | Maximum | Mean | Std. Deviation | Skewness | Kurtosis |
|---------------------|---------|---------|-------|----------------|----------|----------|
| Clay, % | 14.10 | 78.0 | 48.46 | 21.83 | -0.46 | -1.31 |
| Silt, % | 18.0 | 47.0 | 24.17 | 6.62 | 1.69 | 2.88 |
| Sand, % | 0.5 | 66.9 | 27.44 | 21.22 | 0.76 | -0.76 |
| pH(1:1) | 6.6 | 8.6 | 7.82 | 0.45 | -0.63 | 0.04 |
| EC, dS/m | 0.2 | 3.8 | 0.94 | 0.96 | 2.08 | 3.40 |
| CaCO_3 , % | 0.6 | 48.4 | 14.84 | 10.17 | 1.02 | 1.91 |
| LL, % | 23.1 | 77.7 | 52.96 | 14.13 | -0.60 | -0.66 |
| PL, % | 13.7 | 42.4 | 28.38 | 5.35 | 0.02 | 1.05 |
| PI, % | 5.6 | 38.0 | 24.58 | 10.23 | -0.62 | -0.99 |

LL: Liquid limit, PL:Plastic limit, PI: Plasticity index.

Liquid limit (LL) values varied between 23.1% and 77.7% with a mean of 52.96% (Table 1). While clay content had a significant positive correlation (0.845**) with LL, there was a significant negative correlation (-0.514**) between LL and CaCO_3 content (Table 2, Fig. 1). Liquid limit values of the soil samples decreased with increasing the lime content of samples. Similarly, Yazarloo et al. (2017) found that addition of calcite and nanocalcite powder to the clay loam soil decreased liquid limit values. Sivrikaya et al. (2014) reported that when marble and granite powder from stone plants were added to clay soils, there was a reduction of liquid limits.

Plastic limit (PL) values varied between 13.7% and 42.4% with a mean of 28.38% (Table 1). While clay content had a significant positive correlation (0.553**) with PL, there was a significant negative correlation (-0.570**) between LL and CaCO_3 content (Table 2, Fig. 2). Plastic limit values of the samples reduced with increasing the lime content of soil samples. Atanur (1973) found that PL of montmorillonit clay increased with the cation type in the following order: $\text{Na} < \text{H} < \text{Mg} < \text{Fe} < \text{Ca} < \text{K}$. Gülser and Candemir (2004) also reported that plastic limit values had the significant positive correlations with exchangeable Mg, K and Ca contents of the clay soil amended with different organic wastes.

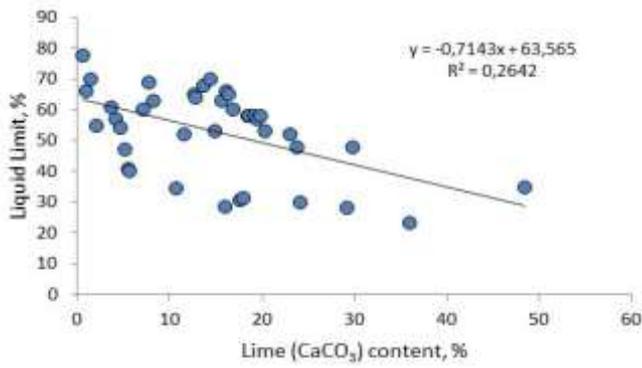


Fig. 1. Effect of lime content on liquid limits of the soil samples.

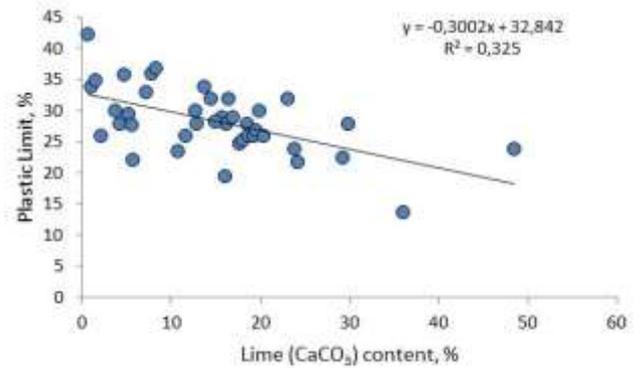


Fig. 2. Effect of lime content on plastic limits of the soil samples.

Table 2. Correlation matrix among the soil properties and Atterberg limits.

| | S | | pH | EC | CaC | | | |
|-------------------|--------|----------|----------|--------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | i | S | | | O ₃ | LL | PL | PI |
| Clay | -0.239 | -0.953** | 0.421** | 0.175 | -0.187 | 0.845** | 0.553** | 0.877** |
| Silt | | -0.067 | 0.115 | 0.132 | 0.490** | -0.300 | -0.259 | -0.279 |
| Sand | | | -0.466** | -0.223 | 0.037 | -0.773** | -0.485** | -0.812** |
| pH | | | | -0.124 | 0.284 | 0.248 | -0.011 | 0.348* |
| EC | | | | | 0.074 | 0.085 | -0.131 | 0.186 |
| CaCO ₃ | | | | | | -0.514** | -0.570** | -0.412** |
| LL | | | | | | | 0.816** | 0.953** |
| PL | | | | | | | | 0.602** |

**significant at 1% level, * significant at 5% level, LL: Liquid limit, PL:Plastic limit, PI: Plasticity index

Plasticity index, which is the difference between LL and PL, was also significantly influenced by the lime content. Plasticity index varied from 5.6 to 38.0% with a mean of 24.58% (Table 1). Plasticity index had a significant positive correlation with clay (0.877**) and a significant negative correlation with lime content (-0.412**). Thompson (1967) determined that although different lime types substantially reduced plasticity index, high calcium, hydrated lime, was most effective. Hussain and Dash (2010) also found that there was an immediate decrease in plasticity index with increase in the lime content.

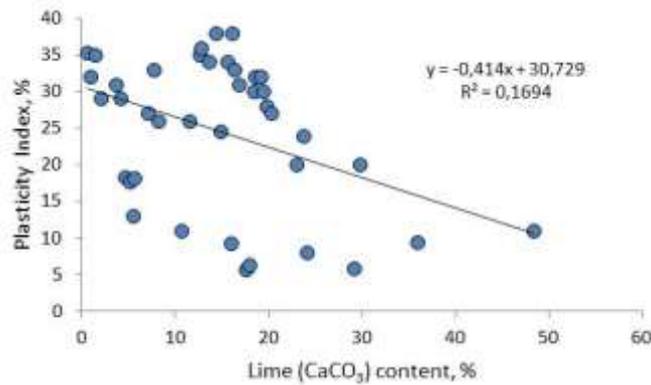


Fig. 3. Effect of lime content on plasticity indexes of the soil samples.

Soil samples used in this study were classified according to the Casagrande Plasticity Chart (Figure 4) as follows; 4 samples (10%) in low plasticity clay, 5 samples (12.5%) in medium plasticity silt, 4 samples (10%) in medium plasticity clay, 9 samples (22.5%) in high plasticity silt and 18 samples (45%) in high plasticity clays. High mean values for LL and PI values had low CaCO_3 contents in high plasticity silt and clay classes. The mean LL and PI values reduced with increasing the mean lime content. Pastor (2019) reported addition of limestone powder to clay soil reduced LL, PI, free swelling index and deformability with increasing strength of the soil. As the amount of lime in the soil increases, the liquid limit and plastic limit increase and the plasticity index decreases in less plastic or non-plastic soils; in plastic soils, the liquid limit decreases and the plastic limit increases (Atanur, 1973). Ogila (2014) determined that the swelling characteristics of high clay soils decreased with addition of the limestone dust to soil.

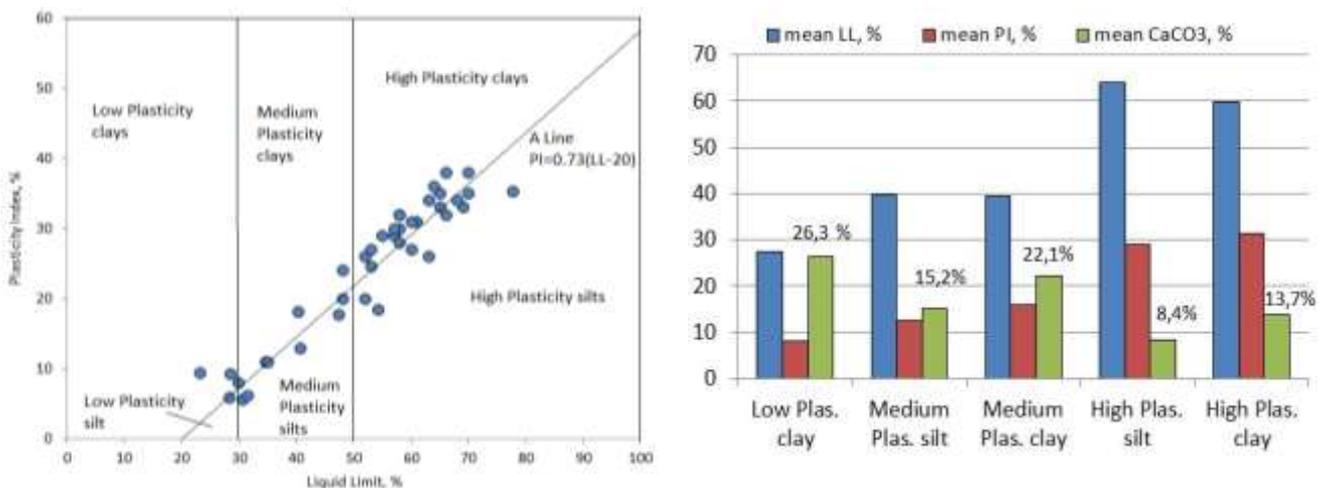


Fig. 4. Classification of the soil samples according to the Casagrande Chart

Conclusion

As a result increasing lime content in clay soils reduces Atterberg limits and plastic properties of soils. While sand content and CaCO_3 contents negatively correlated with Atterberg limits, clay content had positive correlation with them. Increment in lime fractions in clay soils has a dilution effect on soil texture like sand fractions and reduces plastic properties and improves workability of clay soils.



References

- Blake, G.R. (1965) Bulk Density. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, C.A. Black (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 374-390.
- Bronick, C.J., Lal, R. (2005) Soil structure and management: a review. *Geoderma* **124(1-2)**:3-22.
- Candemir, F., Gülser, C. (2007) Changes in some chemical and physical properties of a sandy clay loam soil during the decomposition of hazelnut husk. *Asian J. Chem.* **19(3)**:2452-2460.
- Candemir, F., Gülser, C. (2011) Effects of different agricultural wastes on some soil quality indexes at clay and loamy sand fields. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.* **42 (1)**: 13-28.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. (2000) Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* **64**: 1479-1486.
- Day, P.R. (1965) Particle fractionation and particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, C.A. Black (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 545-567.
- De Neve, S., Van de Steeve, J., Hartmann, R., Hofman, G. (2000) Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. *European Journal of Soil Science* **51(2)**: 295-304.
- Dexter, A.R. (2004) Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120(3-4)**: 201-214.
- Gülser C., Candemir F. (2015) Effects of agricultural wastes on the hydraulic properties of a loamy sand cropland in Turkey. *Soil Science & Plant Nutrition* **61 (3)**: 384-391.
- Gülser, C. (2006) Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma* **131(1-2)**: 33-44.
- Gülser, C., Candemir, F., Kanel, Y., Demirkaya, S. (2015) Effect of manure on organic carbon content and fractal dimensions of aggregates. *Eurasian Journal of Soil Science* **4(1)**:1-5.
- Hillel, D. (1982) Introduction to soil physics. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Isermayer, H. (1952) Eine einfache Methode Zur Bestimmung Der Bodenatmung Und der Karbonate im Böden. *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* **5**:56-60.
- Kacar, B. (1994) Chemical Analysis of Plant and Soil III. Soil Analysis. Ankara University, Faculty of Agriculture No:3, Ankara, Turkey.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. (1986) Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, A. Klute (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 425-442.
- Martens, D.A. (2000) Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology & Biochemistry* **32**, 361-369.
- Parkin, T. B., J. W. Doran, Franco-Vizcaino, E. (1996) Field and laboratory tests of soil respiration. In *Methods for assessing soil quality (Special Publication 49)*, ed. J. W. Doran and A. J. Jones, 231-246. Madison, Wisc.: SSSA.
- Reicosky, D. C., Lindstrom, M.J. (1995) Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. In *Soils and global change*, ed. R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. A. Stewart, 177-187. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Smith, J., Doran, J.W. (1996) Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In: *Methods for Assessing Soil Quality*. Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds), Soil Science Society of America Specific Publication No. 49. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 169-185.
- Soil Survey Staff, (1993) Soil Survey Manual. USDA Handbook. No:18. Washington D.C.
- US Salinity Lab. Staff, (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural Handbook*, No. 64, USDA. Washington DC, USA.
- Usowicz, B., Lipiec, J., 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity* **6(3)**: 263-271.



EFFECT OF TEA WASTE APPLICATION ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES

Gülser C.^{1*}, Kızılkaya R.^{1,2}, Dengiz O.¹

¹Faculty of Agriculture, Soil Science & Plant Nutrition Department of OMU, Samsun, Turkey

²AGROBIGEN Research & Development Trade Ltd.Co, Samsun Technopark, Samsun, Turkey

*cgulser@omu.edu.tr

Abstract. Organic wastes have been widely used to improve soil properties in sustainable agricultural systems. Tea waste is one of the major waste products from the tea production plants located in Eastern Black Sea Region of Turkey. In this study, the effect of tea waste on some soil physical properties such as, bulk density, total porosity, aggregate stability and saturated hydraulic conductivity were investigated. After incorporating 5% of tea waste into a clay loam soil, soil samples were incubated for 5 months under greenhouse conditions. Tea waste application significantly increased organic matter content from 0.77% to 3.55%, soil respiration rate from 1.01 to 3.22 gCO₂/m²day, aggregate stability from 15.66% to 23.53%, total porosity and saturated hydraulic conductivity from 2.36 to 5.20 cm/h while it decreased soil bulk density from 1.20 to 1.01 g/cm³ over the control treatment. It was found that tea waste can be recycled into soils as a soil conditioner to prevent soil degradation with improving soil physical properties.

Keywords: Tea waste, bulk density, aggregate stability, permeability, soil respiration

Introduction

Application of agricultural wastes to soil improves soil physical and chemical properties and enhances biological activities (Candemir and Gülser, 2011). Most benefits from agricultural waste application to soil are derived from improved physical properties related to increase organic matter content rather than its fertilizer value. Increasing organic matter content in soil improves the soil physical properties by increasing nutrient and water holding capacity, total pore space, aggregate stability, erosion resistance, temperature insulation and decreasing apparent soil bulk density and compaction (Chenu et al, 2000; Gülser, 2006; Gülser and Candemir, 2015; Gülser et al., 2015). Also application of organic wastes improves the soil chemical properties by buffering soil pH, increasing electrical conductivity, cation exchange capacity, and soil nutrient content (Smith and Doran, 1996; Candemir and Gülser, 2007; Candemir and Gülser 2011). Intensive agricultural practices causes to soil degradation and decline of soil structure due to decreasing soil organic matter content (Dexter, 2004; Usowicz and Lipiec, 2009). Soil aggregates are the main units of soil structure, and organic matter contribute to the development of soil structure with a binding agent in the formation of aggregates (Bronick and Lal, 2005; Gülser, 2006; Gülser and Candemir, 2015). Hydraulic conductivity is an important soil physical property for determining soil hydrological processes and may change as water permeates and flows in a soil due to various chemical, physical and biological processes (Hillel, 1982). Tea plant is one of the most important agricultural products in the Eastern Black Sea Region of Turkey. Large quantity of tea production waste materials is available in the tea production plant located in the region. Therefore, tea waste material could be recycled as an organic matter source in sustainable agricultural management systems. The objective of this study was to determine the effect of tea waste application as a soil conditioner on soil physical properties.

Objects and methods

A greenhouse study was carried out in a randomized plot design using tea waste for 5 months. After sieving the air dried clay loam soil sample from 4 mm sieve, pots were filled with 1 kg of soil sample. According to oven dry weight basis, 5% rate of tea waste (TW) was incorporated into pots homogenously. Soil samples were irrigated with distilled water to hold moisture level of soils around



field capacity during the experiment. Soil particle size distribution was determined according to hydrometer method (Day, 1965), soil reaction (pH) and electrical conductivity (EC_{25°C}) values in 1:1 soil:water suspension (Kacar, 1994), soil organic matter (OM) by 'Walkley-Black' method and exchangeable cations by ammonia acetate extraction method (Kacar, 1994). According to some soil properties given in Table 1, the soil is a non-saline, moderately alkaline, clay loam, low in organic matter (Soil Survey Staff., 1993). Bulk density (BD) of the each soil core was determined according to Blake (1965). Aggregate stability using a wet sieving method according to Kemper and Rosenau (1986), saturated hydraulic conductivity by constant head method (US Salinity Lab. Sta., 1954) were determined. The basal soil respiration rate (BSR) was determined according to the method of Isermayer (1952) by measuring carbon dioxide (CO₂) Variance analyses of the data were run using SPSS program and pairs of mean values compared using Duncan test.

Table1. Some physical and chemical properties of the soil used in the study

| | | | |
|----------|-----------|---|-------|
| Sand, % | 41.44 | EC _{25°C} , dS m ⁻¹ | 0.40 |
| Silt, % | 24.57 | OM, % | 0.19 |
| Clay, % | 33.99 | Exc. K, cmol kg ⁻¹ | 0.51 |
| Texture | Clay loam | Exc. Ca, cmol kg ⁻¹ | 29.70 |
| pH (1:1) | 8.40 | Exc. Mg, cmol kg ⁻¹ | 7.90 |

Results and discussion

Tea waste application into the clay loam soil increased soil OM content according to the control ($P < 0.01$) (Fig. 1). The highest OM content (3.55%) determined in TEAW treatment. Electrical conductivity values were also significantly increased by TEAW application ($P < 0.01$). Soil OM and EC values in TEAW treatments increased 361% and 595% over the control. Smith and Doran (1996) reported that electrical conductivity can serve as a measure of soluble nutrients for both cations and anions. EC is also useful in monitoring the mineralization of organic matter in soil (De Neve et al., 2000). Candemir and Gülser (2011) found that application of different agricultural wastes increased soil OM contents and EC values in clay and sandy loam soils. They also reported that the highest increment in soil EC value was obtained with tobacco waste application compared with the other treatments.

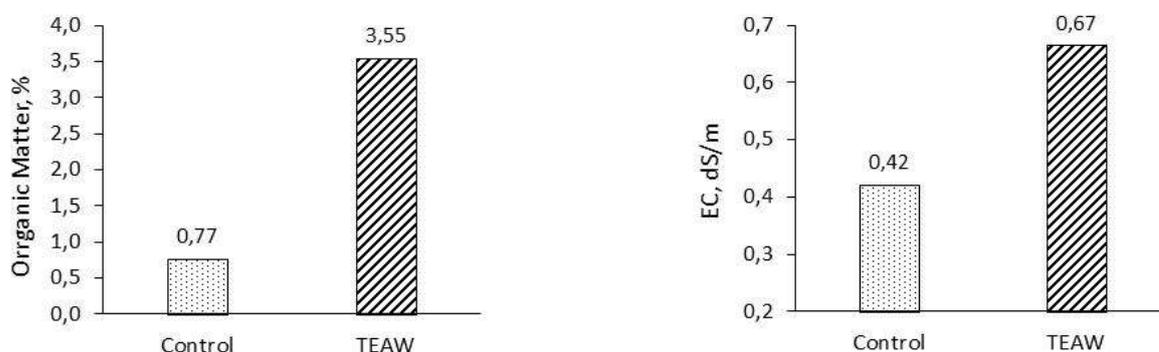


Fig. 1. Effect of tea waste (TEAW) application on soil organic matter and EC values.

Increasing organic matter content in the clay loam soil by the application of TEAW decreased the soil bulk density significantly ($P < 0.01$) (Fig. 2). The lowest bulk density (1.01 g/cm³) was determined with TEAW treatment. The percentage decreases in bulk density by the applications of TEAW was 15.8% according to the control treatment. The total porosity of the clay loam soil also increased from 54% in control



treatment to 62% in TEAW treatment. Soil respiration is the production of carbon dioxide (CO₂) as a result of biological activity in the soil by micro- and macro-organisms (Parkin et al. 1996). The soil respiration rate of clay loam soil increased almost more than three times with increasing from 1.01 to 3.22 g CO₂/m²day by the application of TEAW over the control treatment (Fig. 2). Reicosky and Lindstrom (1995) indicated that if the soil is loosened, the oxygen necessary for organic-matter decomposition and respiration becomes more available, resulting in CO₂ release. In this study, application of TEAW increased the microbial activity in clay loam soil by increasing EC or soluble nutrients and total porosity. Candemir and Gülser (2011) determined that the organic waste application in a loamy sand soil decreased bulk density or increased total porosity and also increased the basal soil respiration rate.

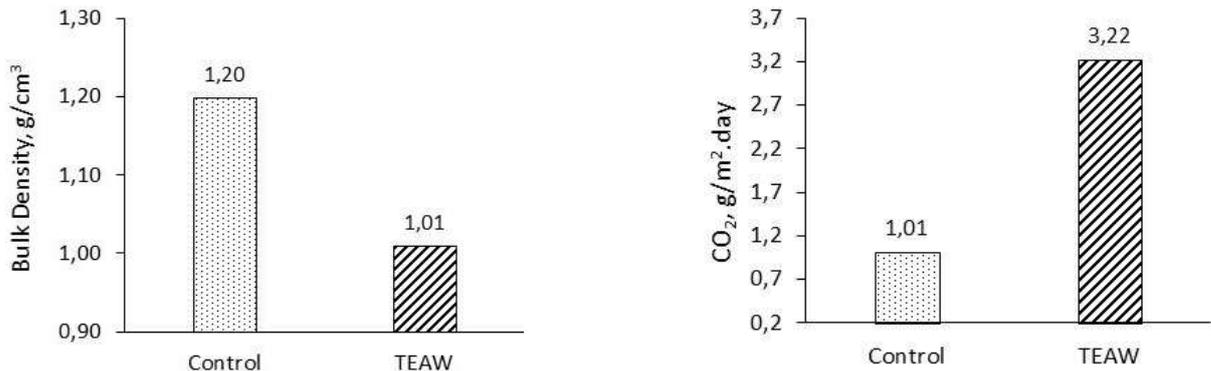


Fig. 2. Effect of tea waste (TEAW) application on bulk density and soil respiration rate.

Tea waste treatment significantly increased aggregate stability of clay loam soil according to the control ($P < 0.01$) (Fig. 3). According to the control treatment, percentage increases in AS by the applications of TEAW was almost 50%. Martens (2000) reported that improved aggregate stability by addition of organic wastes to soils is a result of released plant phenolic acid interactions during the decomposition of residues structural components and increasing microbial activity due to carbonhydrates metabolisms. Gülser (2006) reported that increments in organic C content significantly reduced bulk density and increased total porosity and the proportion of larger aggregates, and that there was a significant positive correlation between OM and AS. In this study, decrease in bulk density caused increase in total porosity and saturated hydraulic conductivity (Fig. 3). TEAW application significantly increased K_s values in soil ($P < 0.01$). Percentage increases in K_s by the TEAW treatment over the control was 55%. Candemir and Gülser (2007) reported that during the decomposition period of organic waste in soil reduced soil bulk density and increased soil permeability due to increases in total porosity and aggregate stability. In this study, it was similarly found that increasing soil OM content due to TEAW application increased soil K_s with increasing total porosity, aggregate stability and reducing BD.

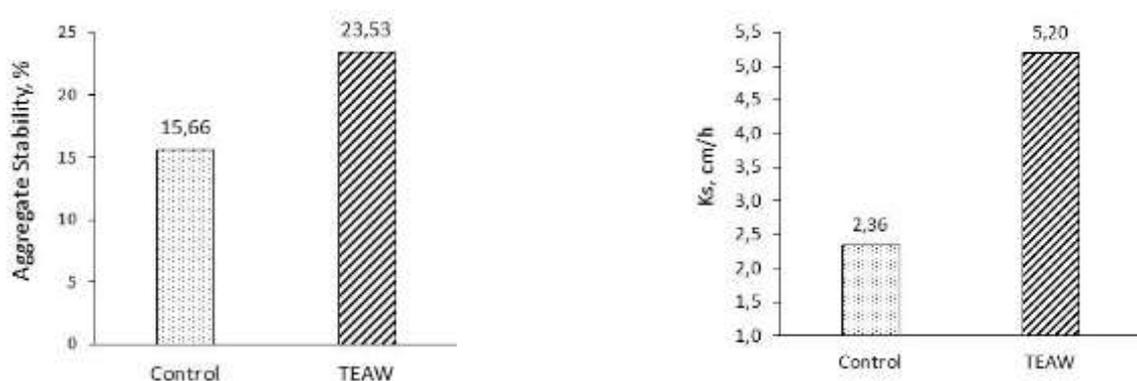




Fig. 3. Effect of tea waste application on aggregate stability and saturated hydraulic conductivity (Ks).

Conclusions

Incorporating TEAW into the clay loam soil increased EC and soluble nutrient contents by the increasing of organic matter mineralization and improved soil aggregate stability. Total porosity of soil increased with reducing bulk density significantly by the TEAW application. Saturated hydraulic conductivity and aggregate stability values increased by increasing OM content and respiration rate of clay loam soil. It can be concluded that tea production waste can be used as a soil conditioner in sustainable agricultural practices.

References

- Blake, G.R. (1965) Bulk Density. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, C.A. Black (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 374-390.
- Bronick, C.J., Lal, R. (2005) Soil structure and management: a review. *Geoderma* **124(1-2)**:3-22.
- Candemir, F., Gülser, C. (2007) Changes in some chemical and physical properties of a sandy clay loam soil during the decomposition of hazelnut husk. *Asian J. Chem.* **19(3)**:2452-2460.
- Candemir, F., Gülser, C. (2011) Effects of different agricultural wastes on some soil quality indexes at clay and loamy sand fields. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.* **42 (1)**: 13-28.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D. (2000) Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* **64**: 1479-1486.
- Day, P.R. (1965) Particle fractionation and particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, C.A. Black (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 545-567.
- De Neve, S., Van de Steeve, J., Hartmann, R., Hofman, G. (2000) Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. *European Journal of Soil Science* **51(2)**: 295-304.
- Dexter, A.R. (2004) Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120(3-4)**: 201-214.
- Gülser C., Candemir F. (2015) Effects of agricultural wastes on the hydraulic properties of a loamy sand cropland in Turkey. *Soil Science & Plant Nutrition* **61 (3)**: 384-391.
- Gülser, C. (2006) Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma* **131(1-2)**: 33-44.
- Gülser, C., Candemir, F., Kanel, Y., Demirkaya, S. (2015) Effect of manure on organic carbon content and fractal dimensions of aggregates. *Eurasian Journal of Soil Science* **4(1)**:1-5.
- Hillel, D. (1982) Introduction to soil physics. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Isermayer, H. (1952) Eine einfache Methode Zur Bestimmung Der Bodenatmung Und der Karbonate im Böden. *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* **5**:56-60.
- Kacar, B. (1994) Chemical Analysis of Plant and Soil III. Soil Analysis. Ankara University, Faculty of Agriculture No:3, Ankara, Turkey.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. (1986) Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Properties*, A. Klute (Ed.). ASA-SSSA, No: 9. Madison, Wisconsin, USA. pp. 425-442.
- Martens, D.A. (2000) Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology & Biochemistry* **32**, 361-369.



- Parkin, T. B., J. W. Doran, Franco-Vizcaino, E. (1996) Field and laboratory tests of soil respiration. In *Methods for assessing soil quality* (Special Publication 49), ed. J. W. Doran and A. J. Jones, 231–246. Madison, Wisc.: SSSA.
- Reicosky, D. C., Lindstrom, M.J. (1995) Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. In *Soils and global change*, ed. R. Lal, J. Kimble, E. Levine, and B. A. Stewart, 177–187. Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.
- Smith, J., Doran, J.W. (1996) Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In: *Methods for Assessing Soil Quality*. Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds), Soil Science Society of America Specific Publication No. 49. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 169-185.
- Soil Survey Staff, (1993) *Soil Survey Manual*. USDA Handbook. No:18. Washington D.C.
- US Salinity Lab. Staff, (1954) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. *Agricultural Handbook*, No. 64, USDA. Washington DC, USA.
- Usowicz, B., Lipiec, J., 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity* **6(3)**: 263-271.



UDC 631. 436

DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALLUVIAL CARBONATE SOILS (CHUMRA REGION, CENTRAL ANATOLIA, TURKEY) IN FIELD AND LABORATORY COLUMN EXPERIMENTS

¹Mikhailsoy F.D., ²Shein E.V., ³Erol A.S., ⁴Erşahin S., ⁵Er F.

¹Igdir University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, Igdir, Turkey

²Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

³Selcuk University, Cumra Vocational School, Konya, Turkey

⁴Çankırı Karatekin University, Department of Soil Science and Ecology, Çankırı, Turkey

⁵Selcuk University, Cumra School of Applied Sciences, Konya, Turkey,

Annotation: This study was conducted to: 1) evaluate performance of four different modeling approaches to predict soil temperature on a soil profile and undisturbed soil column of the same soil and 2) to compare results from soil column and soil profile to decide representative ness of column studies filed conditions. Soil temperature was measured with water-proof portable thermal Sensors on both of soil profile in the field and soil column. Soil heat diffusivity was predicted by four different methods. All four methods performed well in predicting soil temperature in soil profile and soil column, except at 0.3 m depth of soil profile. The measured temperature values were similar in soil column and profile across 0.05, 0.10, and 0.20 m depths, but 0.30 cm, and this was attributed to differences between the conditions at 30 cm depth (lower end) of the soil column and soil profile. The lower end of the column could not represent the conditions at 30 cm depth of the soil profile, while the column was sealed adequately against atmosphere, revealing that column experiment of soil thermal properties may not represent the field conditions even with well-prepared experimental setups.

Key words. Soil thermal properties, heat conductivity, heat diffusivity, heat flow, soil columns

1. Introduction

Soil thermal properties are important in agriculture and metrological applications. They essentially depend on the content of the solid fraction in the soil, including the organic matter content, the mineral composition of the soil, the water content in the soil, and the porosity filled with air [2, 5, 9, 11-12, 14, 16]. Soil thermal variables such as thermal conductivity, heat capacity, and thermal diffusivity principally control soil temperature and soil heat flow [5]. Determination of these parameters is important to understand behavior of soil thermal regime and manage soil temperature at field scale [12]. Several methods are available to model soil thermal properties, including apparent diffusivity, from observed soil temperature [1-2, 6, 10-11, 14-17]. All of these researchers and others noted that most of these models are based on solutions of the one-dimensional heat equation with constant diffusion.

The objective of this study was to compare results of modeling on field and column studies of the same soil. Heat conductivity and diffusivity were predicted on undisturbed soil column and soil profile by four different classical methods and results were compared. We also compared performance of the methods in predicting soil temperature at both of soil column and soil profile.

2. Material and Methods

Material

The study area is located between 37⁰-38⁰ North latitude and 33⁰-34⁰ East longitude. The elevation of the study area is 1013 m from the sea level. Winters are cold and snowy, summers are hot and dry, and falls and springs are cool and rainy. Climate is proper for cultivation of many crops. The lowest temperature (-26.3°C) has been measured in February. The mean annual temperature is



11.4°C and precipitation is 318.9 mm. The soils at the experimental site are clay loam (CL). The soils in the study area are Typical Ustifluvents according to soil Taxonomy [13].

Methods

2.1 The field study

A Soil profile was open at the study site and described according to Schoeneberger et al. (2012). The profile description of the soils is as follows:

Ap horizon: 0-24 cm: Dark yellowish brown (10 YR 4/4 moist), silty clay; weak medium sub angular blocky structure; slightly sticky and moderately plastic when moist; common fine vesicular pores; few, fine roots; very strongly effervescent with 0.1 M HCl; abrupt, smooth boundaries.

A horizon: 24-83 cm: Dark yellowish brown (7.5 YR 4/3 moist), silt clay; weak, coarse, sub angular blocky structure; slightly sticky and slightly plastic when moist; common, fine, tubular pores; few, very fine roots; strongly effervescent with 0.1 M HCl; very abrupt wavy boundary.

AC horizon: 83 cm <: dark brown (7.5 YR 3/3 moist), silt clay; weak, fine, sub angular blocky structure; slightly sticky and slightly plastic when moist; common fine vesicular pores; very strongly effervescent with 0.1 M HCl; few, very fine roots.

Soil temperature was measured with a water-proof portable thermal Sensor (*Thermochron the iButton DS1921G*). The sensor registers and stores temperature measurements in its memory from which can be downloaded by users. The thermal sensors were placed at depths of 0, 2, 5, 10, 15, 20, and 30 cm in the soil profiles.

2.2 The Column Study

An undisturbed soil column with 60 cm in length and 10 cm id was extracted from nearby sensors-placed soil profile. The soil column was placed in a plastic column with 60 cm length and 23.6 cm id and the space between soil column and plastic pipe was filled with perlite. Holes were open in the side of the column at 2, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 cm vertical distances and temperature sensors were placed in the column through these holes. The sensors were connected to a 16 Channel PC-Compatible Elimko 680 Data Logger (Analog/Digital converter, which can convert analog signals to digital ones and save on a computer. The working principles of *Elimko Data Logger System (EDLS)* can be found elsewhere. The apparatus was set to measure and record hourly temperature.

2.3 Calculation of thermal diffusivity of soils

Assuming that a soil is vertically homogeneous, the one-dimensional distribution of the temperature field is described by the following classical equation of heat conduction [1-2, 14-16]:

$$\partial T(z,t) / \partial t = \kappa \partial^2 T(z,t) / \partial z^2 \quad (1)$$

where $T(z,t)$ – is the soil temperature (K or °C) at depth z (m), and t is time (sec); κ – is the apparent soil thermal diffusivity and $\kappa \equiv \lambda / C_v$, where λ – is the thermal conductivity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) and C_v – is the volumetric heat capacity of the soil ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$);

The equation (2) must be solved analytically or numerically to find the temperature change at a given time t and at depth z of the soil. To solve equation (2), initial and boundary conditions are needed that reflect the natural process of heat transfer in the soil. The initial conditions correspond to the state of the variable at the zero (initial) time moment. For the theoretical description of the quasi-stationary regime problem (e.g., the daily or annual variation of the soil temperature), the initial condition is absent (so-called problems without an initial condition) [2, 10-11, 15]. The most convenient characteristic that can appear as a boundary condition of the 1st kind is the dynamics of



the soil surface temperature in the form of the well-known function of time, i.e., a trigonometric polynomial:

$$T(0,t) = T_0 + \sum_{j=1}^m T_j \cos(j \cdot \omega t + \varepsilon_j) \quad (2)$$

in which T_0 – average daily (or annual) temperature of the active soil surface (C); T_j – amplitude of the wave at the surface level for the j^{th} harmonic (C); j – index of the harmonic in the series; $\omega = 2\pi / \tau_0$ – is the angular daily (or annual) frequency; where τ_0 – is the temperature wave period (days or years), for $\tau_0 = 24$ hours: $\omega = 7,27221 \cdot 10^{-5}$ (rad/s); t – time (hours); ε_j – phase angle of the wave at the surface level for the j^{th} harmonic (radians), and m is the harmonic number.

The lower boundary condition is:
$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x,t) = T_0 \quad (3)$$

The solution of equation (1), with the boundary conditions (2) and (3), in dimensionless variables is as follows [4]:

$$T(y,\tau) = T_0 + \sum_{j=1}^m T_{aj} \cdot \cos[j\bar{\omega}\tau + \alpha_j(\varepsilon_j, y)] \quad (4)$$

where, $y = z/L$, $\tau = \kappa t / L^2$, $b_j = \sqrt{j\bar{\omega}/2}$, $\bar{\omega} = \omega L^2 / \kappa$, $T_{aj} = T_j \cdot e^{-b_j y}$ and $\alpha_j(\varepsilon_j, y) = \varepsilon_j - b_j y$ — is the amplitude of temperature fluctuations and initial phase at the dimensionless depth y respectively.

Expressions T_j and α_j depict the decrease of the amplitude and phase shift of the temperature wave due to its penetration from the surface into the deeper layers of the soil.

Solution (4), usually with $m = 1$ or 2 , was used by various researchers to estimate the thermal diffusivity parameter κ .

The main thermal characteristics of the soil are the coefficients of volumetric heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal absorptive (assimilability), heat flow on the soil surface and the damping depth of diurnal temperature waves. The volumetric heat capacity (C_v) of the soil is calculated from the conventional formulas [3, 14, 15]:

$$C_v = C_{m,s} \cdot \rho_b + C_{v,w} \theta, \text{ where } C_{m,s} = C_{m,org} \frac{m_{org}}{m} + C_{m,min} \left(1 - \frac{m_{org}}{m} \right) \quad (5)$$

where, $C_{m,s}$, $C_{v,w}$, $C_{m,org}$, $C_{m,min}$ is the specific heats the soil's solid part, water, and of the organic and mineral components of the soil's solid phase respectively ($J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); ρ_b is the soil bulk density ($g \cdot m^{-3}$) of soil, g/m^3 ; θ is the volumetric moisture content (m^3/m^3); m is the soil's mass, g; m_{org} is the organic matter; m_{org}/m is the content of organic substance in soil (%);

Thermal conductivity (λ) is the product of volumetric heat capacity (C_v) of the soil and thermal diffusivity (κ) and is given as: $\lambda = C_v \cdot \kappa$. The soil's depth d at which temperature oscillations are attenuated is determined by the thermal diffusivity of the soil and is calculated from the following formula: $d = \sqrt{\tau_0 \kappa / \pi}$. A no less important thermal characteristic of soil is heat absorptive, which determines the degree of its heat accumulation, depends on the thermal conductivity λ , the thermal diffusivity κ , and the heat capacity per unit volume C_v , and is calculated from the following relations [2, 11, 14, 16]: $e = \sqrt{\lambda C_v} = \lambda / \sqrt{\kappa} = C_v \sqrt{\kappa}$.

2.3.2 Classical methods for determining the coefficient of apparent thermal diffusion

On the basis of analytical solutions (3) of equation (1), various authors derived formulas and methods for determining the apparent thermal diffusion coefficient [1-2, 7-8, 10-11]. In the present work, the four algorithms were used to estimate the apparent thermal diffusivity κ , based on solving equation (3). These methods estimated the so called apparent thermal diffusivity.



Below are the formulas that are used for the case when the daily temperature variation on the soil surface is represented by one and two harmonics.

Method 1 (Amplitude Equation)

This method has been developed based on Fourier's first law, and has a look [1, pp. 86]:

$$\kappa = \frac{\omega}{2} \cdot \frac{(z_2 - z_1)^2}{\ln^2 \frac{T_{\max}(z_1) - T_{\min}(z_1)}{T_{\max}(z_2) - T_{\min}(z_2)}} \quad (6)$$

where; $T_{\min}(z)$ and $T_{\max}(z)$ – are the minimum and maximum temperature values during the measurement at the depths $z=z_1$ and $z=z_2$ respectively, τ_0 – period of heat wave. This method has the advantage that only four temperature observations (minimum and maximum) at two depths $z=z_1$ and $z=z_2$, are required for the determination of the apparent thermal diffusivity [14].

Method 2 (Phase Equation)

The value of the thermal diffusivity κ of the soil can be found from the equality: $\alpha(\varepsilon, z) = \varepsilon - bz$, which expresses the initial phase at a depth z . For this, knowledge of the initial phases at both depths z_1 and z_2 is necessary. Then we have [11, pp. 237]:

$$\kappa = \frac{\pi}{\tau_0} \left[(z_1 - z_2) / (\phi_2 - \phi_1) \right]^2 \quad (7)$$

Method 3 (Arctangent Equation)

In nature, changes in temperature of the surface of the soil, as a rule, differs from a strict sinusoid. More precisely, the course of the temperature of the soil surface can be approximated by two (or more) harmonics. For two harmonics ($m=2$) the parameter κ can be determined from temperature measurements at 2 depths as an arctangent equation in the form of [7; 11, pp. 283]:

$$\kappa = \frac{\omega(z_2 - z_1)^2}{2 \cdot \arctan^2 \left\{ \frac{[T_1(z_1) - T_3(z_1)][T_2(z_2) - T_4(z_2)] - [T_2(z_1) - T_4(z_1)][T_1(z_2) - T_3(z_2)]}{[T_1(z_1) - T_3(z_1)][T_1(z_2) - T_3(z_2)] + [T_2(z_1) - T_4(z_1)][T_2(z_2) - T_4(z_2)]} \right\}} \quad (8)$$

Method 4 (Logarithmic Equation)

Using the assumption made above for Method 3, Kolmogorov (1950) showed that the parameter κ can be calculated, for 4 observation times, the following equation [4, 6, 10]:

$$\kappa = \frac{4\pi \cdot (z_2 - z_1)^2}{\tau_0 \cdot \ln^2 \left\{ \frac{[T_1(z_1) - T_3(z_1)]^2 + [T_2(z_1) - T_4(z_1)]^2}{[T_1(z_2) - T_3(z_2)]^2 + [T_2(z_2) - T_4(z_2)]^2} \right\}} \quad (9)$$

where $T_i(z_1)$ and $T_i(z_2)$ in the formulas (19)-(20) are the soil temperature values at the depths $z=z_1$ and $z=z_2$, respectively, at the time at the time moment $t_i = i \cdot \tau_0 / 4$ ($i=1,2,3$ and 4) (for our example $\tau_0 = 24$ h and $t_1=6$, $t_2=12$, $t_3=18$ and $t_4=24$ h).



Methods 3 and 4 are analogous to Methods 1 and 2 but take advantage of a greater number of temperature observations to approximate a potentially non sinusoidal behavior.

3. Results and Discussion

Vertical changes of soil properties in soil profile and soil column are depicted in Table 1. The soil profile and the column were similar in vertically distributed soil properties, except bulk density between 0.1 and 0.2 m depth.

Table 1. Properties of soil profile and soil column

| Depth (z), m | Clay % | Silt % | Sand % | BD kg m ⁻³ | OM % | θ m ³ m ⁻³ | Cv kJ m ⁻³ °C |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|---------|--|-----------------------------|
| Soil profile | | | | | | | |
| 0.00-0.10 | 38.69 | 54.15 | 7.16 | 1.2187 | 0.14 | 0.30177 | 2283.9 |
| 0.10-0.20 | 40.52 | 55.58 | 3.91 | 1.4314 | 0.12 | 0.34551 | 2645.1 |
| 0.20-0.30 | 40.31 | 53.93 | 5.75 | 1.2908 | 0.11 | 0.30546 | 2359.7 |
| 0.00-0.30 | 39.84 | 54.55 | 5.61 | 1.3136 | 0.12 | 0.31758 | 2429.6 |
| Soil column | | | | | | | |
| 0.00-0.10 | 38.98 | 53.97 | 7.06 | 1.200 | 0.15 | 0.21577 | 1908.2 |
| 0.10-0.20 | 39.88 | 55.33 | 4.79 | 1.299 | 0.13 | 0.19618 | 1909.1 |
| 0.20-0.30 | 41.50 | 56.07 | 2.43 | 1.362 | 0.11 | 0.22080 | 2064.9 |
| 0.00-0.30 | 40.12 | 55.12 | 4.76 | 1.287 | 0.13 | 0.21092 | 1960.7 |

BD: Bulk density; OM: Organic matter; θ : Volumetric water content; Cv: Volumetric heat capacity

The volumetric water content, θ , is always greater in soil profile than soil column, which may have an important effect on heat diffusivity. Also, volumetric heat capacity was lower in soil column, resulted from the lower θ .

Figure 1 gives the daily behavior of surface and soil temperatures at different depths for field and column.

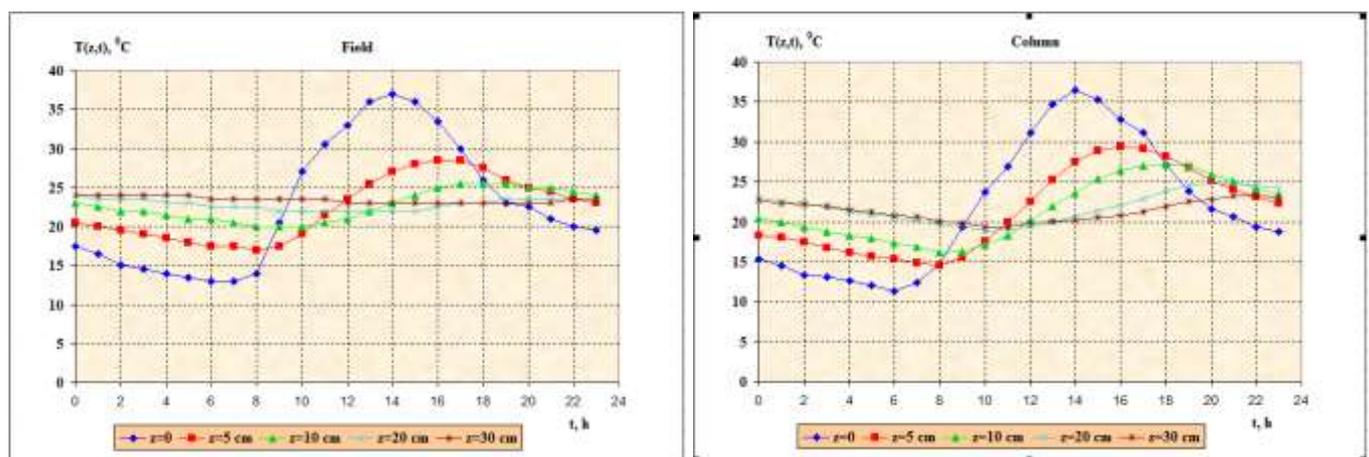


Fig. 1. Changes in the temperatures of the active surface and the soil at different depths.

To determine the parameters of the soil's active surface (T_0 , T_i , and ϵ_i), we adopted one and two harmonics in condition (2). Using the measurement results for $x = 0$, that is, $T(x = 0, t_i)$, using the least squares method, we determined the parameters of the temperature distribution of the surface of the in studied soils.



Table 2 gives results of calculation of the parameters T_0, T_j and ε_j , and also statistical characteristics of approximation between $T(0, t_i)$ – the initial data, and $\tilde{T}(0, t_i)$ – the data computed from formula (2) for $n = 1$ and $n = 2$.

As can be seen from Table 2, the introduction of the second harmonic makes it possible to determine with high accuracy the parameters of the temperature distribution on the soil surface.

Table 2. Parameters of the field and column soils surfaces and model performance

| The Parameters at the soil surface | Study Area | Numbers of harmonics | | | |
|---|------------|----------------------|---------|-----------------|---------|
| | | $m = 1$ | | $m = 2$ | |
| Mean Temperature at soil surface (T_0), °C | Field | T_0 | 22,7708 | T_0 | 22,7708 |
| | Column | | 21,750 | | 21,750 |
| Amplitude of oscillations of the soil surface temperature (T_i), °C | Field | T_1 | 10,6215 | T_2 | 3,9884 |
| | Column | | 11,1119 | | 3,2132 |
| Phase shift | Field | ε_1 | 2,3784 | ε_2 | -0,6212 |
| | Column | | 2,3181 | | -0,7892 |
| Statistical approximation parameters | | | | | |
| Coefficient of Determination, % | Field | R^2 | 86,45 | R^2 | 98,64 |
| | Column | | 91,58 | | 99,24 |
| Root Mean Squared Error (RMSE) T in t | Field | $\sigma_{T/t}$ | 3,2572 | $\sigma_{T/t}$ | 1,0877 |
| | Column | | 2,6099 | | 0,8278 |
| Mean Absolute Percentage Error (MAPE) , % | Field | A | 13,0738 | A | 4,2024 |
| | Column | | 10,6595 | | 3,3925 |
| Normalized Standard Error or Theil's U Statistic or | Field | UII | 0,1231 | UII | 0,0390 |
| | Column | | 0,1025 | | 0,0308 |

R^2 –coefficient of Determination, $RMSE$ –Root Mean Squared Error, $MAPE$ –Mean Absolute Percentage Error, and UII – Theil's U Statistic.

Mean values for soil thermal diffusivity (κ), thermal conductivity (λ), and damping depth (d), calculated by amplitude, arctangent and logarithm methods, are given in Table 3. The values for κ , λ , and d predicted for the column were greater than those for soil profile, in all the cases.

Table 3. The mean values of the thermal diffusivity (κ), thermal conductivity (λ), damping depth (d), and heat absorptive (e) of studies soils, calculated by three different methods.

| Type of methods | Study Area | C_v | $10^{-6}\kappa$ | λ | d | e | B |
|-----------------|------------|---|-----------------------|--|------------|---|--|
| | | $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ | m^2/s | $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ | m | $\text{W} \cdot \text{h}^{0.5}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ | $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ |
| Amplitude | Field | 2429,6 | 0.3618 | 0,8790 | 0,0997 | 24,3563 | 12,4622 |
| | Column | 1960,7 | 1,1579 | 2,2703 | 0,1785 | 35,1641 | 17,9920 |
| Arctangent | Field | 2429,6 | 0.3157 | 0,7671 | 0,0932 | 22,7538 | 11,6423 |
| | Column | 1960,7 | 0,6048 | 1,1858 | 0,1290 | 25,4133 | 13,0032 |
| Logarithm | Field | 2429,6 | 0.7209 | 1,7515 | 0,1408 | 34,3816 | 17,5918 |
| | Column | 1960,7 | 1,2905 | 2,5303 | 0,1884 | 37,1225 | 18,9943 |
| Phase | Field | 2429,6 | 0,1610 | 0,3913 | 0,0666 | 16,2500 | 8,3145 |
| | Column | 1960,7 | 0,2561 | 0,5022 | 0,0839 | 16,5379 | 8,4619 |

After determining the parameter values of the thermal diffusivity κ , by the formulas (6)–(9), for the soil temperature were calculated values $T(z, t)$ for depths 5, 10, 20 and 30 cm.



Temperature-values were predicted using the κ – values found by the methods given in Table 3. Measured temperature-values were compared with predicted ones to evaluate the performance of the methods.

All four methods predicted satisfactory values temperature well at 0.05, 0.10 and 0.20 m depths of soil profile and soil column. For example, for depth $z=5$ and 30 cm the results are shown in Figures 2. On the other hand, none of the models performed adequately at 0.30 cm depth of soil profile compared to at that of soil column.

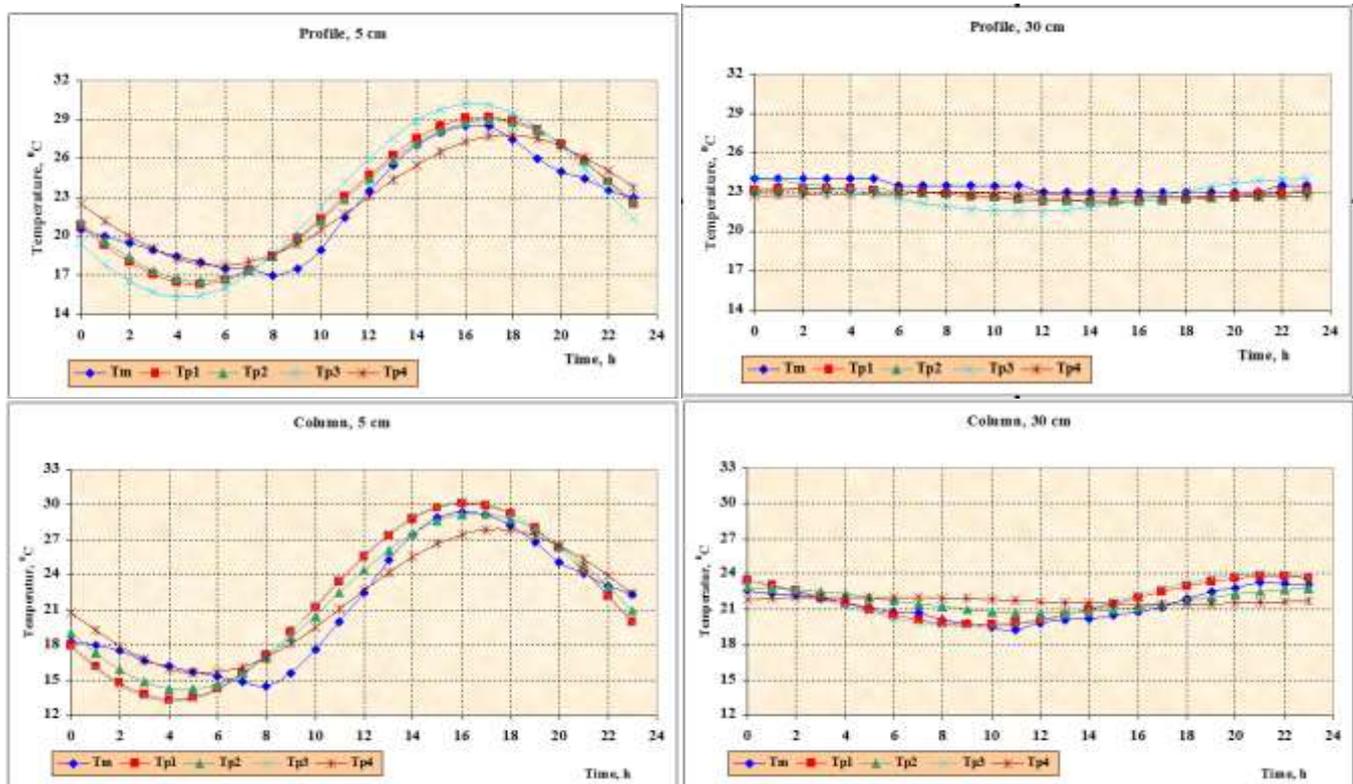


Fig.2. Measured (T_m) and amplitude (T_{p1}), arctangent (T_{p2}), and logarithm (T_{p3})-predicted soil temperature values at 0.05 m and 0.30 m soil depths on soil profile and on soil column.

The reason may be attributed to that Also, the measured values at 0.30 cm of soil profile were far different from those of soil column (Fig.2), which we attributed to that that the lower end of the column is open to atmosphere while that of the profile is not, and this would induce the differences in temperature-time relation between soil column and profile at 0.3 m depth. In addition to that, the ambiances of soil column and soil profile are highly different vertically as well as horizontally. The soil column was isolated form the atmosphere with perlite in the outer column, while soil profile as a continuous soil space in both vertically and horizontally.

The calculation results showed that, Phase Method (equation 7) outperformed the Methods of Amplitude, Arctangent and Logarithm in predicting soil temperature in profile for depth 5 and 10 cm, while Arctangent outperformed the others in column soils for depths 20 and 30 cm.

4. Conclusions

All four methods nearly predicted similar values of soil temperature at 0.05, 0.10, and 0.20 m depths of soil column and soil profile, but at 0.3 m of both of the soil profile and soil column different results. The soil column was highly similar to soil profile in bulk density, soil texture, organic matter



content, but soil water content and volumetric heat capacity, and this resulted in greater values of soil heat diffusivity, soil heat conductivity, and dumping depth to occur in the latter.

All four three models performed well in predicting soil temperature at all the studied depths in both of soil column and profile, except at 0.30 m of soil profile.

The method comprising heat wave phase amplitude outperformed the rest of the models in predicting soil temperature in soil column for $z=0.05$ and 0.10 m, while that comprising the arctangent outperformed the others in the soil profile for $z=0.20$ and 0.30 m.

Measured values of soil temperature at 0.3 m of soil column were highly different from those of soil profile due to that the lower end of the soil column was open to atmosphere in the latter. The results show that the column studies may not represent the conditions in the field even in the well-prepared experimental conditions since differences in the surrounding media between soil profile and soil column cannot be removed entirely.

Acknowledgment

The authors thank Selcuk University for supporting this study under the grant BAP(13401088).

References

1. Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959) Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford, 1959, ed. 2, 510 p.
2. Chudnovsky A.F. (1962) Thermophysical characteristics of dispersed materials. M.: Fizmatgiz, 1962. 456 p. . [in Russian].
3. de Vires D.A., Philip J.R. (1986) Soil heat flux, thermal conductivity, and the null-alignment method. *Soil Science Society of America Journal*, **50**, 12-18.
4. Gao Z., Wang L. and Horton R. (2009) Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **6(2)**, 2247-2274.
5. Hillel D. (2004) Introduction to soil physics. Academic Press, San Diego, CA, USA. 494 p.
6. Horton R. Jr. (1982) Determination and use of soil thermal properties near the soil surface. New Mexico State University. 151.
7. Kaganov M.A., Chudnovsky A.F. (1953) On the determination of the thermal conductivity of the soil. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Geography*, **2**, 183-191.[in Russian].
8. Kolmogorov A.N. (1950) On the question of determining the coefficient of thermal diffusivity of the soil. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Geography and geophysics*, **2(14)**, 97-99. [in Russian].
9. Lipiec J., Usowicz B., Ferrero A. (2007) Impact of soil compaction and wetness on thermal properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **50**, 3837–3847.
10. Mikayilov F. D., Shein E.V. (2010) Theoretical bases the experimental methods definitions of thermal diffusivity of soil, *eurasian soil science*, **43(5)**, 536–544.
11. Nerpin S. V., Chudnovskii A. F. (1967) Soil Physics, Nauka, Moscow, 584 p [in Russian].
12. Ochsner T.E., Horton R., Ren T. (2001) A New Perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 1641.
13. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C. (2012) Soil Survey Staff, Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 3., 2nd ed. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln,
14. Shein E.V. (2005) Soil Physics Course. M.: Moscow Univ. Publ., 2005. 432 p. [in Russian].
15. Tikhonov A. N., Samarskiy A. A. (1966) Mathematical Physics Equation. M.: Nauka, 1966. 724 p. [in Russian].



16. Voronin A. D. (1986) Fundamentals of Soil Physics. M. : Publishing House of Moscow. Un-ta, 244 p. [in Russian].
17. Wierenga P.J., Nielsen D.R. Hagan R.M. (1969) Thermal properties of soil based on field and laboratory measurements. *Soil Sci.Soc. of Am. Proc.* **33**, 354-360.



UDC 631.425

ANALYSIS OF SOIL GRAIN-SIZE FRACTIONS IDENTIFIED BY LASER DIFFRACTION DECONVOLUTION

Vodyanitskii Yu.N.* , Savichev A.T., Morgun E.G.

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russia,
yu.vodyan@mail.ru

Introduction

At present, the goal of soil size analysis is to determine the exact content of each fraction S . In classical pipet-analysis, the fraction content is set by the discrete analysis method itself, which implicitly assumes uniform probability density within given limits, although it does not correspond to reality. The real probability density is detected by laser diffraction (LD), which makes it possible to obtain differential LD spectra [3, 6–8]. But the content of particles S is determined by the formal principle: by the area of the area under the curve of the LD-spectrum, bounded on the sides by verticals restored at the boundaries of the fractions defined by this classification. But the vertical walls at the boundaries are an abstraction that does not take into account the real statistical distribution of particles, and the number of LD fractions N depends on the accepted classification. Grain-size fractions, as well as many natural distributions, have no sharp boundaries, and the fractions usually have a normal distribution with “tails” of different lengths and are approximated by Gaussian [5]. To obtain the desired Gaussians, the differential soil composition curves have been proposed to be split, deconvoluted, to obtain a set of LD fractions. At the same time, we get new indicators: the number of fractions n , the average diameter of each fraction $d_{average}$ and its dispersion D , as well as the adjusted content of each particle size LD-fraction S_{LD} .

The name of the LD-fraction is given by the position of its average diameter $d_{average}$ within the fractions of the selected particle size classification. Kaczynski’s soil classification has been adopted [2] in Russia; the FAO classification has been adopted in many countries of the World [1]. Although both classifications divide the entire particle range from 0 to 2000 μm on a logarithmic scale into 9 groups, they differ in the width of the range of fractions. In both classifications, with increasing particle size, the width of fractions increases. But this increase goes with different steps $F = d_{up} / d_{down}$, where d_{up} is the upper boundary of the fraction, and d_{down} is its lower boundary. The FAO classification is designed so that the pitch of the fractions F is constant, it is assumed to be $F = 3.2$ [1]. On the contrary, the index of the width of the fractions in the Kaczynski system is variable and is $F = 2$ or 5 , with the result that some fractions have been narrowed with $F = 2$, and others with $F = 5$ are excessively extended. Another national classification (the Italian) has a similar deficiency [4]. The constant value of the index F is an important advantage of the classification of FAO [7]. In this paper, we will use the FAO classification.

Objective: to use the soils LD-spectra deconvolution of to determine the number of particle size fractions, their dispersion and the content of particles in them.

Objects and methods

Vertisol soil complex of temperate climate was described and sampled in the southeastern European part of Russia in the North Caucasus region, Stavropol region Soils are formed on marine clay under native steppe vegetation. This soil complex consists of Sodic Haplusterts (microhigh and microslopes) and Typic Epiaquet (microlow).



The particle-size distribution of the vertisols was determined on an “Analysette 22 comfort” laser diffraction particle-size analyzer (FRITSCH, Germany). The original soil samples were ground with a rubber-tipped pestle and sieved through a 0.25 mm sieve. 30 ml of distilled water was added to the sample (0.10-0.13 g) and the soil was dispersed using a “Digital Sonifir 250” ultrasonic disperser (Branson Ultrasonics) with a probe-type dispersing element at a frequency of 20 kHz. Ultrasound energy is 450 J / ml.

Other soils were analyzed according to the literature [3, 6]. Samples of cambisol, loess and loess-sediment were collected in Tibet, China. The key section examined in this current study is located at 4016 m asl close to a little village called Suohuduo in the Anyemaqen Shan. To remove the organic matter, the samples were treated with 0.7 ml 20% H₂O₂ at 70 °C for several hours. This process was repeated 4 times over a period of two days. To keep particles dispersed, the samples were treated with 1.25 ml Na₄P₂O₇ for 12 h. Particle size was measured with a Laser Diffraction Particle Size Analyzer (Beckman Coulter LS 13 320).

The deconvolution method of the LD spectra was previously described in [7, 8].

Results and discussion.

The table 1 shows the content of fractions, calculated by the old method: by the areas of the sections of the differential LD-curve with vertical boundaries, and the new characteristics of the LD-fractions.

Table 1. Soil particle size fractions.

| Group (µm) | Without deconvolution | | | | After deconvolution | | | |
|---------------|---------------------------------|---------------------------|-------|------|---------------------|---------------------------|-------|------|
| | Share S, % | Share S _{LD} , % | d, µm | D | Share S, % | Share S _{LD} , % | d, µm | D |
| | Vertisol, elevation, AU-horizon | | | | Cambisol | | | |
| mC (0.2-0.63) | 10.2 | 11.6 | 0.47 | 0.50 | 5.4 | 15.2 | 0.57 | 1.52 |
| cC (0.63-2.0) | 24.4 | 33.7 | 1.73 | 0.51 | 8.4 | | | |
| fSi (2.0-6.3) | 44.2 | 37.5 | 4.48 | 0.52 | 13.0 | | | |
| mSi (6.3-20) | 18.3 | 17.3 | 13.5 | 0.69 | 23.8 | 63.0 | 16.1 | 1.70 |
| cSi (20-63) | 2.7 | | | | 30.3 | 15.5 | 37.3 | 0.52 |
| fS (63-200) | | | | | 11.0 | 4.6 | 184.9 | 0.66 |
| mS (200-630) | | | | | 4.5 | 1.9 | 601.8 | 0.24 |
| | Vertisol, slope, AU-horizon | | | | Loess-like sediment | | | |
| mC (0.2-0.63) | 6.3 | 7.0 | 0.49 | 0.49 | 5.9 | 12.3 | 0.43 | 1.38 |
| cC (0.63-2.0) | 17.8 | 23.3 | 1.75 | 0.45 | 8.2 | | | |
| fSi (2.0-6.3) | 38.4 | 36.7 | 4.75 | 0.55 | 18.3 | | | |
| mSi (6.3-20) | 21.0 | 9.0 | 11.6 | 0.55 | 28.2 | 58.6 | 8.5 | 1.44 |
| cSi (20-63) | 15.1 | 22.9 | 27.1 | 0.62 | 18.3 | 8.3 | 33.1 | 0.54 |
| fS (63-200) | 1.1 | | | | 19.1 | 20.9 | 112.2 | 0.64 |
| mS (200-630) | | | | | 1.6 | | | |
| | Vertisol, slope, Cv-horizon | | | | Loess | | | |
| mC (0.2-0.63) | 14.1 | 16.0 | 0.46 | 0.49 | 3.2 | | | |
| cC (0.63-2.0) | 21.8 | 31.4 | 1.80 | 0.50 | 4.9 | 10.2 | 0.77 | 1.52 |
| fSi (2.0-6.3) | 51.6 | 43.1 | 4.39 | 0.48 | 5.5 | | | |
| mSi (6.3-20) | 12.2 | 10.4 | 9.49 | 0.65 | 18.8 | | | |
| cSi (20-63) | | | | | 57.3 | 38.0 | 27.1 | 1.70 |
| | | | | | | 53.0 | 33.8 | 0.52 |



| | | | | | | | | |
|-------------|--|--|--|--|-----|--|--|--|
| fS (63-200) | | | | | 8.5 | | | |
|-------------|--|--|--|--|-----|--|--|--|

The distribution of the LD-fractions of the remaining soils shows a completely different picture.

Vertisols. It has no sand particles. In three soils the number of traditional fractions $N = 4-6$. The number of LD-fractions is lower: $n = 4-5$. The difference in the content of particles calculated without deconvolution is small: $\Delta S_{\max} = 9.3-12\%$; it falls on the group of middle silt and coarse clay. Each LD-fraction takes its place within the FAO classification; the fine silt fraction is dominates: $S_{LD} = 37-43\%$. The particle distribution of all LD-fractions is slightly scattered, as evidenced by their low dispersions $D = 0.45-0.69$.

Cambisol. It has the number of traditional fractions $N = 7$. The main traditional fraction is coarse silt ($S \approx 30\%$). The number of LD-fractions is lower: $n = 5$. The middles of the thin LD-fractions fall on the average clay ($0.2-0.63 \mu\text{m}$) and on the average silt ($6.3-20 \mu\text{m}$); this LD-fraction accounts for the maximum fraction of particles $S_{LD} = 63\%$. The reason is that the particles distribution in the fine fractions is very blurred: dispersion D reaches $1.52-1.70$. Probably, the wide scattering of particles determines the absence of intermediate fractions of coarse clay and fine silt, the particles of which do not form their own group, but they are the “tails” of the fractions with a $d_{\text{average}} = 0.57$ and $16.1 \mu\text{m}$. Thus, the degree of scattering of the groups of two fine fractions D serves as an indicator of their heterogeneity. The reasons for the high dispersion of fine fractions can be different: either the weak weathering of particles $<20 \mu\text{m}$, or the preservation of strong micro-aggregates that withstand dispersation.

Loess deposition. It has the number of traditional fractions: $N = 7$. The main traditional fraction is the average dust ($S \approx 28\%$). The number of LD-fractions is lower: $n = 5$. The content of LD-particles of average silt increases significantly: up to $S_{LD} \approx 59\%$. High fine fractions dispersions with $D = 1.38-1.44$ are determine the absence of individual fractions of coarse clay ($0.63-2.0 \mu\text{m}$) and fine dust ($2.0-63 \mu\text{m}$).

Loess. The number of tradition fractions reaches $N = 6$. The main traditional fraction is coarse silt ($S \approx 57\%$). Deconvolution revealed only $n = 3$ fractions: coarse clay and two fractions with close values of $d_{\text{average}} = 27.1$ and $33.8 \mu\text{m}$. In total, the coarse silt content is reaches $S_{LD} \approx 90\%$, against $S \approx 57\%$ without deconvolution. Two loess fractions smaller than $30 \mu\text{m}$ are distinguished by high scattering ($D = 1.52$ and 1.70). This entails two consequences. First, there are no LD-fractions with an average diameter of d_{average} in the intervals: $2.0-6.3$ and $6.3-20 \mu\text{m}$, that is, there are no fractions of fine and medium silt. We emphasize that a small amount of particles found using the old method of calculation reflects not independent fractions of fine and medium silt, but only “tails” of adjacent dispersed group distributions of coarse clay and coarse silt. Also, the influence of “tails” can explain the absence of an independent fraction of the average silt in the loess. Secondly, the average diameters of two fractions fell into the coarse dust fraction. Such a combination means extremely low weathering of particles of coarse dust, which is not surprising for the soil in the arid climate of Tibet.

Conclusion.

The content of LD-fractions of soil size distribution is traditionally determined by the area under the differential LD-spectrum, bounded from the side by verticals, restored at the boundaries of conditional fractions. This is inconsistent with the statistical nature of the particle distribution. The decovolution method of differential LD-spectra allows obtaining more complete and accurate information on the particle size distribution of the soil. Deconvolution allows getting the number of fractions, their average diameter and the dispersion of the distribution of particles. The number of LD-fractions n is lower than the fractions determined by the traditional method N . After



deconvolution, the fraction of the contribution of individual particle size fractions changes. This change is not great for a heavy, clayey compound, but it is significant for cambisols and loess-like soils and sediments. The dispersion of LD-fractions of vertisols is low $D < 1$, which indicates a high degree of weathering of all particle-size fractions. But the dispersion of fine fractions of cambisols, loess loam and loess is high $D > 1$, which indicates a weak weathering of the particles. The FAO nomenclature of the grain size composition can be used in a new way: to name LD-fractions with a statistically normal distribution of particles.

The authors thank Yu.A. Zhukova and A.V. Yudina for research assistance.

References

1. FAO (2006). Guidelines for soil description, 4th ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
2. Kachinskiy N. A. (1965). Soil physics, Nauka. Moscow. (in Russian).
3. Lehmkuhl F., Schulte P., Zhao H., Hülle D., Protze J., Stauch G. (2014). Timing and spatial distribution of loess and loess-like sediments in the mountain areas of the northeastern Tibetan Plateau // *Catena*. V. 117. P. 23-33.
4. MiPAF (Ministero delle Politiche Agricole e Forestali). (2000). Metodi di analisi chimica del suolo. Collana di metodi analitici per l'agricoltura. Franco Angeli Editore, Milan, Italy.
5. Sadovsky M.A. (1983). The distribution of the solid dimensions, Reports of the Academy of Sciences of the USSR, V. 269(1). P. 69-72. (in Russian).
6. Schulte P., Lehmkuhl F., Steininger F., Loibl D., Lockot G., Protzea J., Fischer P., Stauch G. (2015). Influence of HCl pretreatment and organo-mineral complexes on laser diffraction measurement of loess-paleosol sequences . *Catena*. V.137. P. 392–405.
7. Vodyanitskii Yu.N., Milanovsky E.Yu., Morgun E.G., Savichev A.T. (2019). Deconvolution of vertisols differential particle size distribution curves. *Eurasian Soil Sci.* V. 74. № 9.
8. Vodyanitskii Yu.N., Savichev A.T. (2019). Method of laser diffraction spectra's deconvolution for characteristics strength of soil micro-aggregates. *Ann. Agr. Sci.* V. 16. № 1.



UDC 631.43

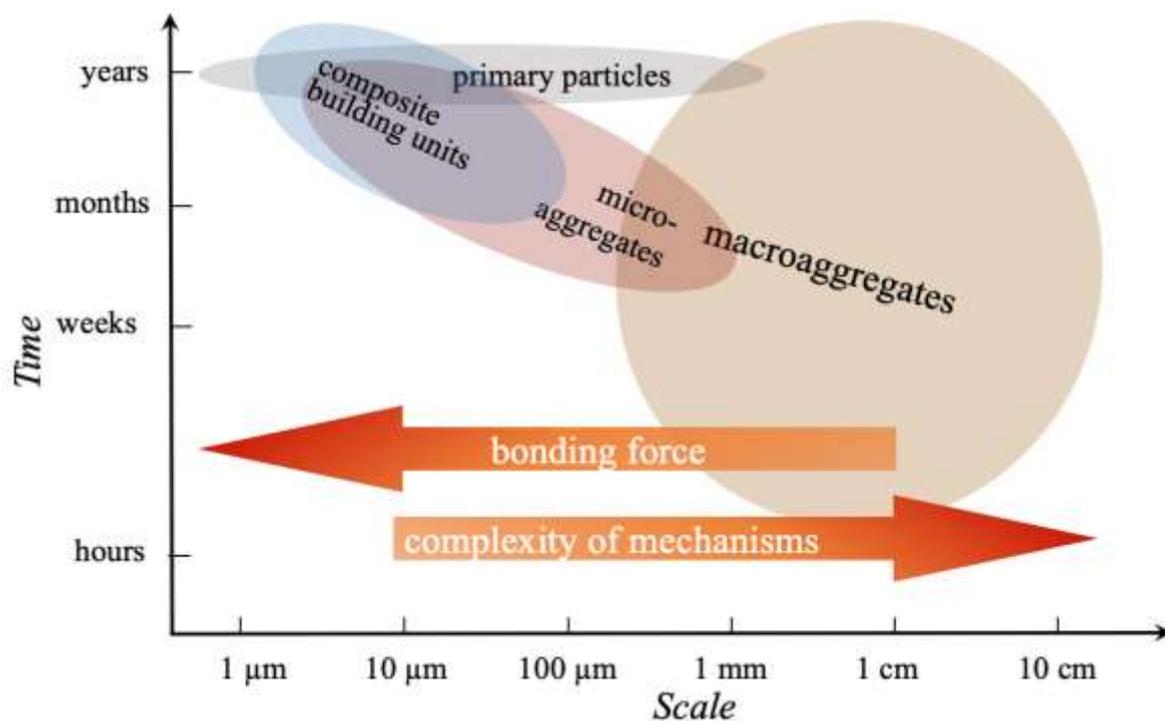
COMPOSITION AND DYNAMICS OF SOIL MICROSTRUCTURE LEVELS

Yudina A.V.

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute
yudina_av@esoil.ru

Annotation: Structure is the most complex soil property having dualistic nature. It determines all the soil processes, and also is their reflection. The goal of this presentation is separation of soil microstructure levels by its composition, mechanisms of organization, stability and dynamics.

Structure is the most complex soil property having dualistic nature. It determines all the soil processes, and also is their reflection. Each structure level is characterized by specific interactions, processes, dynamics and functions that can be used as criteria for their separation (Pic. 1).



Pic.1. Levels of aggregate soil structure

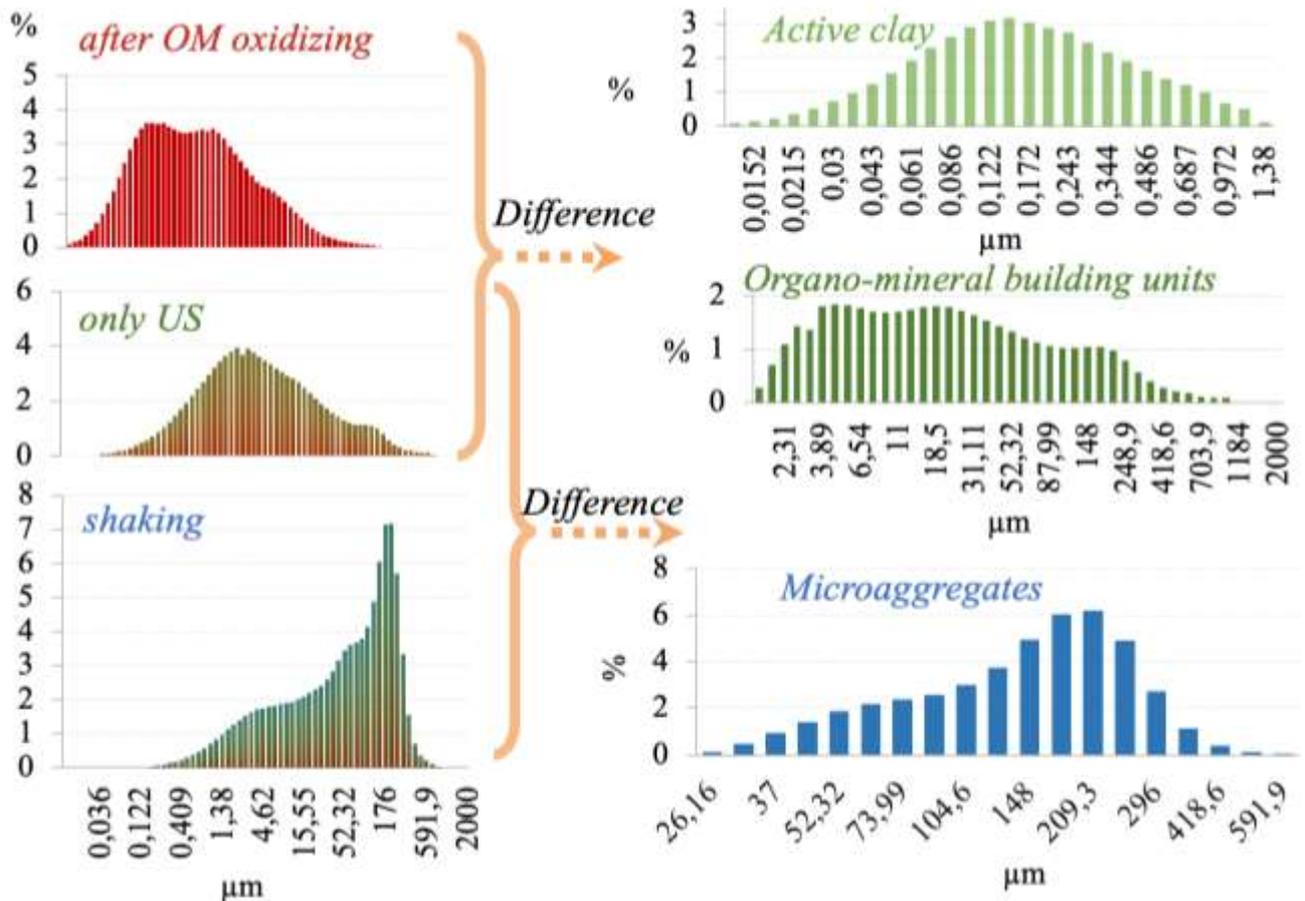
The goal of this study is describing of soil microstructure organization for 10 main zonal soil types - from Podzols to Ferrasols.

Laser diffraction analyses combined with chemical, ultrasonic and hydraulic stresses on soil samples allowed to distinguish three types of microstructures – primary particles, composite building units (syn. elementary soil particles) and microaggregates. Their relationships with physico-chemical properties were described.

Soil organic carbon (SOC) was closely linearly correlated ($R^2=0.83$) to the differences between elementary particle size distribution (obtained after pretreatment by ultrasonic energy equal of $450 \text{ J} \cdot \text{ml}^{-1}$; Yudina et al., 2018) and microaggregate size distribution (obtained after intense stirring (2500 min^{-1}) of water suspension after 10 minutes). SOC however, is not unique binding agent for the formation of such elementary soil particles. Particles in Ferrasols are



strongly bound by organic matter (OM), whereas elementary soil particles in Retisols, Phaeozems and Vertisols are not really bound by OM and presented by particulated organic matter because of complete oxidation of such particles. Microaggregate content (sum of differences between microaggregate size distribution and elementary particle size distribution) in Retisols has a positive relationship ($R^2=0.60$) with content of crystalline Fe oxides and negative ($R^2=0.68$) with amorphous Fe oxides. Microaggregation in Chernozems increases in AB horizon and occurs under specific ratio of SOC and carbonate content. Thus, types of soil microstructures and their sizes and localization were described (Pic. 2).



Pic.2. Microstructure organization of Ferrasols A horizon

Acknowledgment

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-34-00825; with the involvement of the equipment of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute CCU SO “Functions and properties of soils and soil cover”.

References

- Yudina A., Fomin D., Kotelnikova A., Milanovskiy E. From the Notion of Elementary Soil Particle to the Particle-Size and Microaggregate-Size Distribution Analyses: A Review// *Eurasian Soil Science* **51(11)**, 1326-1347. DOI: 10.1134/S1064229318110091. <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1064229318110091>



УДК 631.4

ОТКРЫТАЯ И ЗАКРЫТАЯ ПОРИСТОСТЬ КАК ИНДИКАТОРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Абросимов К.Н.¹, Горбов С.Н.²

Почвенный институт им. В.В. Докучаева, г. Москва
Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону
kv2@bk.ru

OPEN AND CLOSED POROSITY AS INDICATORS OF TRANSFORMATION OF SOIL STRUCTURE

Abrosimov K.N., Gorbov S.N.
V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia
The Southern federal university, Rostov-on-Don, Russia

Annotation: The work is devoted to the study of the porosity of chernozem soils of different degrees of anthropogenic transformation, the definition of occupancy of the indicators "open porosity" and "closed porosity".

Введение

Общая пористость – один из физических показателей, определяющих структурное состояние почвы, уплотнение структуры при механическом или ином воздействии. С развитием методов анализа структуры, в т.ч. не повреждающих – компьютерной томографии, появилась возможность изучения объемных структур. Показатель общей пористости стало возможно раскрыть на ряд составляющих: пористость открытую, пористость закрытую и связанность порового пространства.

Закрытая пористость – поры разного размера, обособленные от остального порового пространства в пределах заданного объема.

Открытая пористость – поры разного размера, выходящие на границы исследуемого объема. [3]

Связанность порового пространства – это фактически самый крупный связанный объем пор в пределах исследуемой области.

Таким образом, если общая пористость зависит от разрешения томографической съемки, то открытая и закрытая, как и связанность пор, должны быть привязаны к определенному одинаковому объему – стандарту для таких исследований, для возможности сравнения различных типов почв.

Объект и метод исследования

В качестве объекта исследования использованы монолиты почв ($d=3\text{см}$). В исследовании задействованы: 1) Почвы естественного сложения, существенно не затронутые процессами урбанизации; 2) Почвы естественного сложения, перекрытые рыхлыми антропогенными отложениями. 3) Почвы естественного сложения и антропогенно-преобразованные почвы, перекрытые асфальтовым и/или другим водонепроницаемым покрытием, под которым почвенный профиль схож с урбостартоземами (Urbic Technosol) и урбистратифицированными черноземами (Calcic Chernozem Novic (Technic)) UR-[A-B-BC-Csa] [1]. В качестве условного эталона сравнения был выбран чернозем обыкновенный карбонатный мощный на лёссовидном суглинке (Calcic Chernozem по WRB)[2]. Разрез был заложен на территории Персиановской заповедной степи, расположенной в 52 км северо-восточнее Ростовской агломерации.



Томографическую съемку специально отобранных горизонтов проводили на микротомографе SkyScan1172 с общим разрешением на все исследуемые образцы 16.42 мкм/пиксель. Образцы снимали с сохранением условий естественной влажности и структуры, для чего пробы отбирали в специально подготовленные медицинские шприцы диаметром 3 см, с последующей герметичной упаковкой. Объем томографически исследованной зоны для каждого образца = 1,8 см³.

Результаты и обсуждение

Данные томографической съемки (Табл. 1) четко показывают различия в уровне плотности и характере агрегированности городских почв из разных функциональных зон и разного генезиса. Гор. А лесопарковой зоны характеризуется хорошей агрегированностью на фоне высокой пористости, в то время как погребенные гумусово-аккумулятивные горизонты антропогенно-преобразованных почв отличаются невыраженной агрегированностью и монолитностью. По полученным данным, минимальные величины общей и открытой, видимой на томограммах, пористости (11.6 и 1.2% соответственно) характерны для гумусово-аккумулятивных горизонтов экранированного урбостратозема и экранированного чернозема урбистратифицированного. Максимальные значения по данному показателю – 38% общая пористость и 24% открытая пористость – зафиксированы в гор. А чернозема обыкновенного карбонатного тучного лесопарковой зоны города.

Таблица 1. Показатели пористости для черноземов Ростовской агломерации.

| Название почвы | Чернозем высокогумусный (лесопарк) | Чернозем обыкновенный карбонатный мощный, Г. Аксай, залежь | Урбистратифицированный чернозем экранированный карбонатный, Ростов-на-Дону, селитебная зона | Чернозем обыкновенный карбонатный мощный г. Ростов-на-Дону, лесопарк | Чернозем обыкновенный карбонатный мощный, Ростов-на- | Урбостратозем экранированный на погребенном черноземе | Чернозем обыкновенный карбонатный мощный, пос. Песчановский. |
|--------------------------------------|------------------------------------|--|---|--|--|---|--|
| Общий объем образца, мм ³ | 1826,3 | 1826,30 | 1826,30 | 1826,30 | 1826,3 | 1826,3 | 1826,30 |
| Закрытая пористость, % | 1,35 | 2,48 | 3,03 | 1,64 | 2,00 | 3,10 | 1,97 |
| Открытая пористость, % | 26,60 | 15,15 | 15,19 | 26,09 | 12,23 | 5,08 | 21,46 |
| Общая пористость, % | 27,58 | 17,26 | 17,76 | 27,30 | 13,99 | 8,02 | 23,01 |
| Связанность порового пространства, % | 97,17 | 39,81 | 87,29 | 96,71 | 88,69 | 58,61 | 94,72 |

Максимальные значения закрытой пористости отмечены в наиболее антропогенно-трансформированных почвах – урбостратоземах и экранированных черноземах, более 3% (или от 17 до 39% от общей пористости). Низкая связанность порового пространства помимо урбостратоземов выявлена в залежи у города Аксай, в остальных случаях показатель незначительно отличается от эталонного образца. По итогу: урбостратозем значительно



отличается от эталона по всем показателям в худшую сторону – отмечены явные признаки переуплотнения и деградации порового пространства, почвы лесопарков наоборот по некоторым параметрам незначительно превосходят эталонный образец. Чернозем урбостратифицированный и залежный из г. Аксай незначительно уступают по пористости эталону и лесопарковым черноземам, но при этом показатели закрытой пористости у них сопоставимы с уплотненными почвами.

Вывод

Показатели открытой, закрытой пористости и связанности порового пространства дополняют друг друга и могут выявить проблемы там, где просто показатель общий пористости, рассчитанный традиционным способом, не далек от нормы.

Благодарности

Исследование выполнено с привлечением оборудования ЦКП «Функции и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева.» ЦКП «Биотехнология, биомедицина и экологический мониторинг» и ЦКП "Высокие технологии" Южного федерального университета при поддержке проектов РФФИ 18.34.00825 и 19.04.01056.

Литература

1. Физические свойства почв Ростовской агломерации / Горбов С.Н., Безуглова О.С., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Тагивердиев С.С., Морозов И.В. // Почвоведение. — 2016. — № 8. — С. 964–974
2. IUSS Working Group WRB. World References Base for Soil Resources 2006. First update 2007, World Soil Resources Reports, 103, FAO, Rome. 2007.
3. CTan Usermanual 2014



УДК631.41

МИКРОТОМОГРАФИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КОРКОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ПУСТЫННЫХ ПОЧВ – КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ ИХ ГЕНЕЗИСА И ДИАГНОСТИКИ

Абросимов К.Н.¹, Голованов Д.Л.^{1,2}, Лебедева М.П.¹

¹ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
m_verba@mail.ru

² Географический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация
dm_golovanov@mail.ru

Abrosimov K.N.¹, Golovanov D.L.^{1,2}, Lebedeva M.P.¹
¹V.V. Dokuchayev Soil Science Institute, Moscow, Russia
²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The proportion of closed pores in the vesicular horizon can serve as a diagnostic indicator of desertification. Isolated pores dramatically reduce water permeability. Microtomographic studies with detailed characteristics and classification of pores and pore space in combination with micro-morphological and submicroscopic are an indispensable method of studying desert soil formation

Введение

Как известно, везикулярный корковый горизонт наряду с пустынной мостовой, покрытой пустынным загаром, являются отличительными морфологическими особенностями пустынных ландшафтов и, в то же время, общепризнанными признаками пустынного педогенеза.

Везикулярный корковый горизонт предлагается считать диагностическим и включить в обновленную Soil Taxonomy (Turk and Graham, 2011, 2014). С 1958 года в американской почвенной школе поверхностные пористые корковые горизонты традиционно обозначаются как Av (везикулярные) горизонты (Springer, 1958). Согласно WRB (2014), этот поверхностный горизонт uermic обозначается как Aye и служит диагностическим признаком или uermic классификатором (ye) пустынной подгруппы почв в различных почвенных группах (WRB, 2014). Ранее он был определен как диагностический горизонт uermic.

В Классификации и диагностике почв России (2004, 2008), также как и в WRB, корковый горизонт первоначально, по предложению М.А. Глазовской и М.П. Аранбаева, выделялся как самостоятельный горизонт AKL (2004), но был «понижен» до признака (2008). Проведенные нами в настоящих и крайнеаридных пустынях Монголии и Казахстана исследования подтвердили выявленные ранее закономерности (Евстифеев, 1980, Гунин, 1990, Панкова, 1992, Fox et al., 2009): выраженность коркового горизонта (мощность, освещенность, пористость, низкая водопроницаемость) нарастает по мере усиления засушливости климата. Микроморфологический анализ показал увеличение доли изолированных пор по градиенту аридности (Fox et al., 2009, Лебедева и др., 2009, 2014; Lebedeva et al., 2015). Однако выводы, полученные для плоских срезов (шлифов), нуждаются в подтверждении для всех направлений и объема. Помочь в этом может именно микротомография (Скворцова и др., 2015).

Задачей настоящего исследования, в развитие предыдущих работ (Лебедева и др., 2014, 2015), было выявление доли замкнутых (изолированных) пор в корковом (везикулярном) горизонте пустынных крайнеаридных почв Монголии.



Объекты и методы

Микротомографическое исследование сложения коркового горизонта пустынных почв выполнено на микротомографе SkyScan 1172 с разрешением изображения 5 мкм в пикселях. Этот неразрушающий метод позволяет уверенно определять внутреннее строение образцов почвы, отдельные поры и твердую фазу (вплоть до отдельных структурных образований — отдельных микроагрегатов, железистых конкреций, минеральных зерен и др.) с высокой степенью надежности. Томографические данные обрабатывали в программном обеспечении CTvox (объемная структура образца) и STan (объемные морфометрические значения).

Шлифы были изготовлены в четырех повторностях из вертикально ориентированных почвенных микромонолитов. Поскольку поверхностные горизонты имели ограниченную толщину, их тонкие срезы имели площадь всего 2-4 см². Описание шлифов проводили на оптическом микроскопе Olympus BX51, оснащенный камерой Olympus DP26 с использованием международных руководящих принципов (Stoops, 2003).

Результаты и обсуждение

На основе томографического анализа отдельных сечений и в результате реконструкции 3D-образца из коркового горизонта (Гоби, Монголия), было выявлено, что образец был разделен четкой границей на две части (верхнюю и нижнюю) с различными характеристиками пор и агрегатов (Рис. 1).

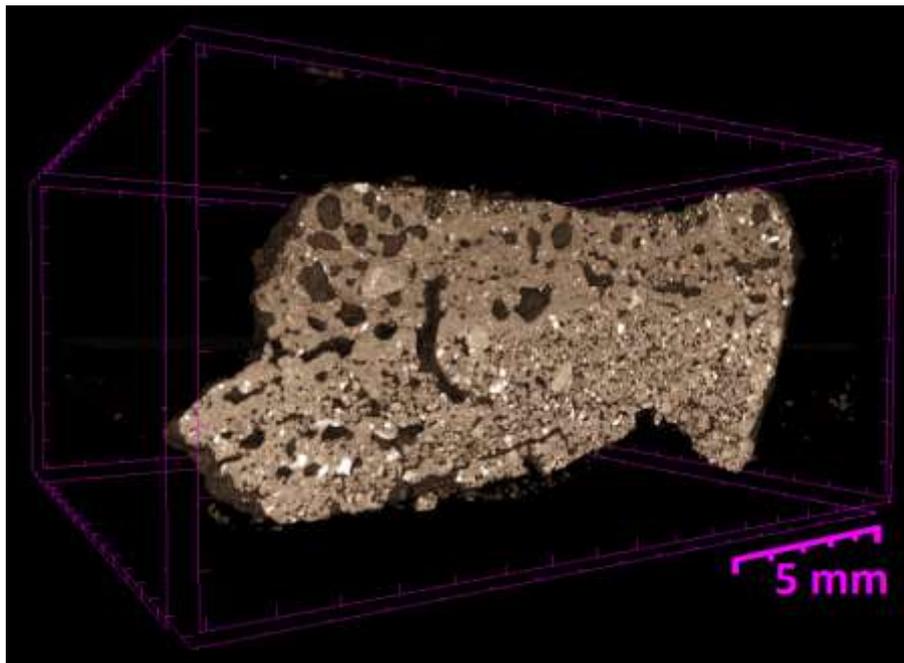


Рис. 1. 3D модель строения коркового горизонта. Вертикальное поперечное сечение через центр. Поры темные, минеральные зерна светло-коричневые или белые.

Они были подвергнуты отдельному анализу (пористость и распределение твердой фазы) с последующим сравнением полученных данных. Расчеты проводились с использованием программы STan для отдельных томов, как показано на рисунке 3. Выбранные трехмерные фигуры имели диаметр 700 пикселей (7 мм) и высоту 150-170 пикселей. В приведенных ниже данных части изученного горизонта также называются "верх" и "низ" везикулярной корки.



Количественные параметры верхней и нижней части везикулярной корки существенно различались. По сравнению с нижней частью, в верхней было в 2-3 раза меньшее количество пор, но общая пористость была в 2 раза выше, из-за большего размера пор (табл. 1, рис. 3, 4).

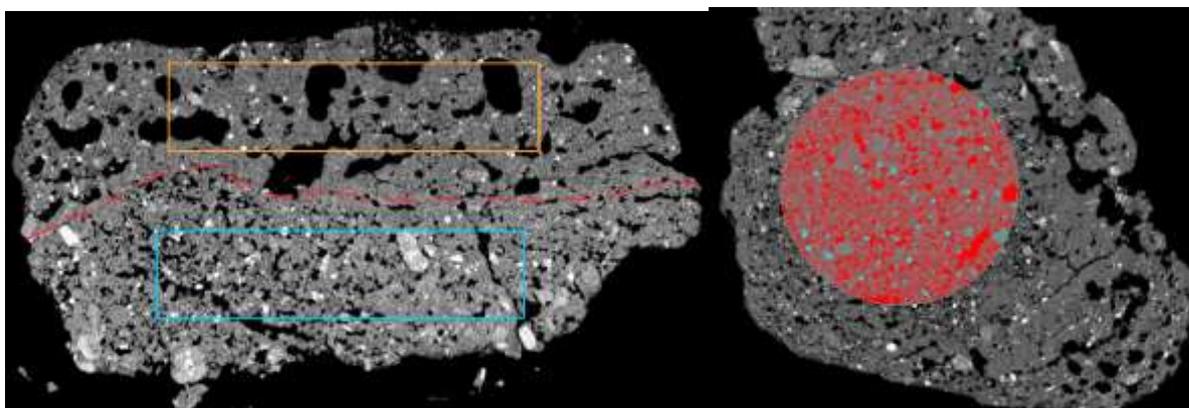


Рис. 2. 3D-формы (элементы), используемые при расчете параметров пористости и твердой фазы на единицу объема (Гоби, Монголия). Слева – вертикальное поперечное сечение с отмеченной (красной) границей между верхней и нижней частями образца, где выделения выделены оранжевым и синим цветом соответственно. Справа – фрагмент горизонтального сечения (вид сверху, выделен красным).

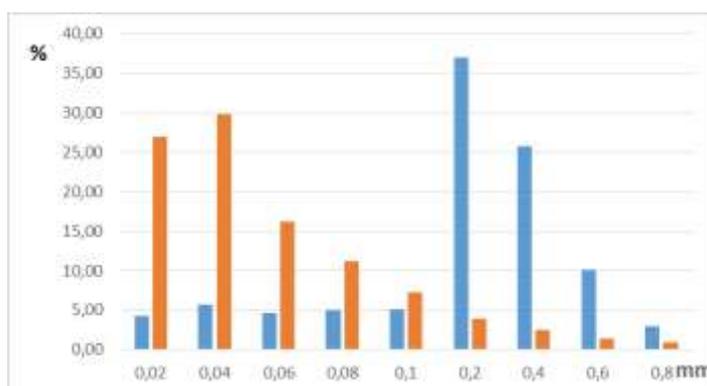


Рис. 3. Средние размеры пор и их доля в общем объеме порового пространства в верхней и нижней частях коркового горизонта пустынной почвы Монголии.

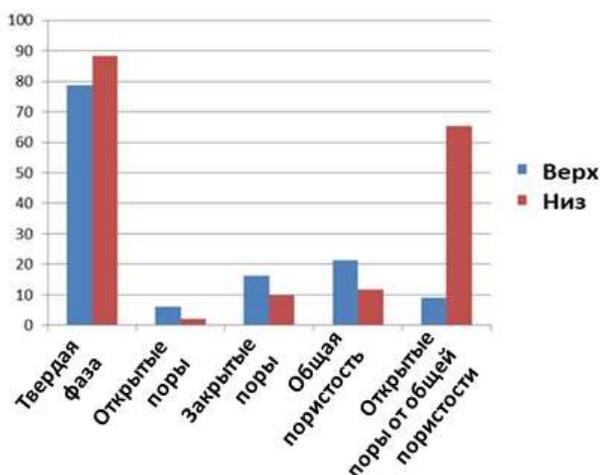


Рис. 4. 3-D параметры на основе томографического анализа верхней и нижней частей корки (объемн. %)



Количество структурных элементов твердой фазы (почвенных агрегатов и зерен, $1/\text{мм}^3$) значительно больше в нижней части горизонта Av в сравнении с его поверхностью (табл. 1). Это соответствует более рыхлому сложению почвы в нижней части горизонта. Верхняя часть горизонта почвенной корки характеризовалась наличием крупных везикулярных пор, изолированных друг от друга и от более мелких пор. Их развитие сопровождалось уплотнением твердой фазы: содержание микропор размером менее 50 мкм было очень низким (не более 5% от общего объема пор) (рис. 4). Несмотря на высокий процент открытой пористости, везикулярные поры были полностью изолированы друг от друга, как показано на снимке с разрешением 10 мкм. По строению верхняя часть корочки напоминала спрессованную застывшую пену. Ее поверхностные пузырьки были открыты и частично заполнены частицами почвы. В нижней части преобладали микропоры (до 70% от общего порового пространства), но почти отсутствовали в верхней. В нижней части пор размером более 250 мкм не обнаружено (рис. 3). Значения связности порового пространства в верхней и нижней частях были наиболее контрастны. 9% связности порового пространства (рис. 4) указывает на очень низкую инфильтрационную способность верхней части коркового горизонта пустынной почвы.

Табл. 1. 3-D параметры пустынной корки по данным томографического анализа

| 3-D характеристика (параметр) | Единица измерения | Верх | Низ |
|--|-------------------|-------|--------|
| Число томографических срезов для 3D- | | 173 | 151 |
| Разрешение | μm | 10.4 | 10.4 |
| Общий объем образца | mm^3 | 74.0 | 64.6 |
| Число твердофазных объектов в 1 mm^3 | $1/\text{mm}^3$ | 40.3 | 195.2 |
| Число замкнутых пор на 1 mm^3 | $1/\text{mm}^3$ | 340.0 | 1110.2 |
| Суммарное количество пор 1 mm^3 | $1/\text{mm}^3$ | 392.0 | 1172.7 |
| Число контактов между объектами в 1 | $1/\text{mm}^3$ | 105.8 | 511.3 |

Следствия низкой водопроницаемости коркового горизонта, в частности, околопоровое обезжелезнение, четко диагностируются микроморфологически (рис. 5).

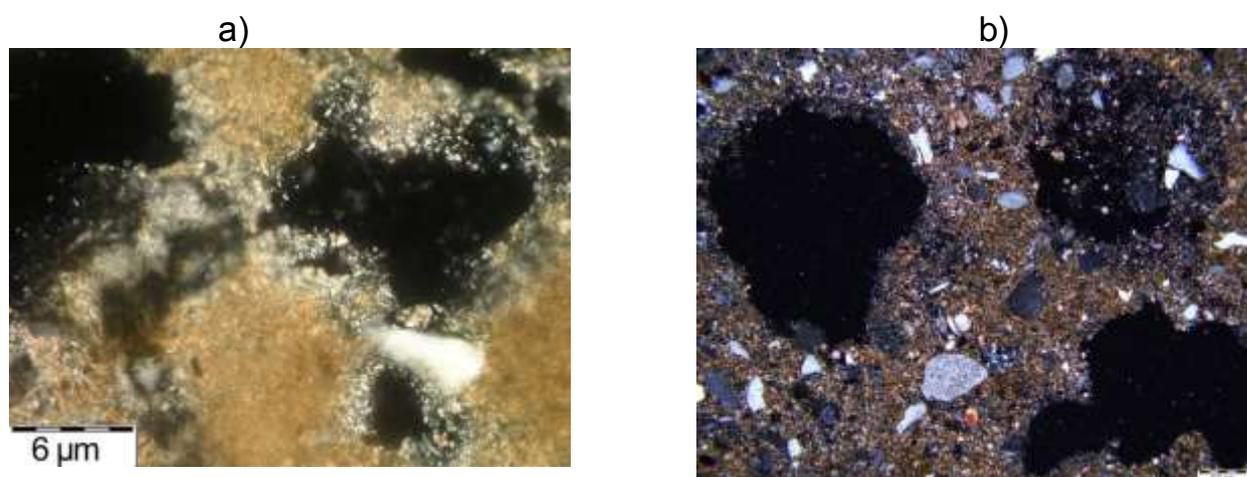


Рис. 5. Микростроение плазмы горизонта Av под отмошкой в крайнеаридных почвах пустыни Гоби: а) околопоровое обезжелезнение (разр 10, XPL); (b) преобладание везикулярных пор в слабо карбонатном песчано-глинистый материале, (разр ЮГ-24, XPL).



Выводы

1. Доля замкнутых пор коркового горизонта может служить диагностическим показателем опустынивания.
2. Изолированные поры резко снижают водопроницаемость. Даже на фоне небольшого количества осадков, но в ливневой форме, это служит предпосылкой ударной гидратации, «аморфизации» слоистых алюмосиликатов, вспышки микробиологической активности, в том числе анаэробнобиозиса (!).
3. Микротомографические исследования с детальной характеристикой и классификацией пор и порового пространства в сочетании с микро-морфологическими, субмикроскопическими и электронно-зондовыми служат незаменимым методом изучения пустынного почвообразования.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проекты № 18-04-00638, 19-04-01056).

Литература

1. Евстифеев Ю.Г. Крайнеаридные почвы Гоби // Проблемы освоения пустынь. 1980 № 2 С. 20–30.
2. Индикационное и диагностическое значение микротомографической и микро-морфологической характеристики коркового горизонта пустынных почв ПОЧВ (Гоби, Монголия) / Д. Л. Голованов, М. П. Лебедева, К. Н. Абросимов, М. А. Лебедев // Материалы Пятой международной конференции "Практическая микротомография". — АПР Москва, 2018. — С. 36–43.
3. Лебедева М.П., Голованов Д.Л. Микростроение пустынных почв Монголии. Почвоведение. — 2009. — № 11. — С. 1294–1307.
4. Панкова Е.И. Генезис засоления почв пустынь. М.: Наука, 1992. 135 с.
5. Скворцова Е.Б., Шеин Е.В., Абросимов К.Н. и др. Рентгеновская микротомография в Российском почвоведении: достижения и перспективы // Современные методы исследований почв и почвенного покрова. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2015. С. 19-35
6. Fox S. J., Mills A. J., and Poch R. M., 2009, Micromorphology of surface crusts in the Knersvlakte, South Africa. *J. Mt. Sci.*, 6 (2), 189–196.
7. Lebedeva M.P., Golovanov D.L., and Abrosimov K.N., 2016, Micromorphological diagnostics of soil, aeolian and deluvial processes according to the peculiar fabric of crusty horizons in different-aged extreme aridic soils of Mongolia, *Quaternary International*, Elsevier. Online 2016. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.12.042.
8. Pagliai, M., Stoops, G., 2010 Physical and Biological Surface Crusts and Seals. In: Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F. (Eds), *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*, 419–440, Elsevier, Amsterdam.
9. Springer, M.E., 1958. Desert pavement and vesicular layer of some soils of the Desert of the Lahontan Basin, Nevada. *Soil Science Society of America Journal* 22, 63–66.
10. Stoops, G. 2003. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. *Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI*. 184 pp.
11. Turk K. J. and Graham C. R., 2011, Distribution and properties of vesicular horizons in the Western United States, *Soil Science Society of America Journal*, 75 (4), 1449–1461.
12. Turk K. J. and Graham C. R., 2014, Analysis of Vesicular Porosity in Soils using High Resolution X-Ray Computed Tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78(3), 868-880.
13. World Reference Base for Soil Resources, International Soil Classification System (IUSS/FAO, Rome, 2014), 190 p.



УДК 546.47 631.415.1 631.432.26

ИЗУЧЕНИЕ КИСЛОТНОСТИ И КАТИОННОГО СОСТАВА ПОЧВЕННЫХ РАСТВОРОВ, ИЗВЛЕЧЕННЫМИ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТРИЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Анисимов В.С., Санжаров А.И., Корнеев Ю.Н., Анисимова Л.Н., Фригидов Р.А., Фригидова Л.М., Пименов Е.П., Кочетков И.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249030, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия,
e-mail: vsanisimov@list.ru

THE STUDY OF ACIDITY AND CATION COMPOSITION OF SOIL SOLUTIONS EXTRACTED BY DIFFERENT METHODS DEPENDING ON THE MATRIX PRESSURE OF THE SOIL MOISTURE
Anisimov V.S., Sansharov A.I., Korneev Ju.N., Anisimova L.N., Frigidova L.M., Frigidov R.A., Pimenov E.P., Kochetkov I.V.

Annotation: For soddy-podzolic sandy loam soil in the range of available plants of productive moisture, the dependence of the composition of extracted by centrifugation quasi-equilibrium soil solutions from soil moisture in the conditions of contamination of Zn was investigated. Data on the content of basic macro - and microelements K, Na, Ca, Mg, Mn, Fe, and Zn in soil solutions were obtained. In addition, the dependence of the acidity of soil solutions on soil moisture in the variants of the experiment with the cultivation of agricultural plants and on black steam was established.

Keywords: soil, Zn, macroelements, microelements, soil solution, centrifugation, barley, capillary-sorption potential, concentration

Введение

Состав почвенного раствора отражает различные виды взаимодействий, протекающих в гетерогенной системе на границе с твердой фазой почв. Существует мнение [Смагин, 2018, Зайцева, 1997; Трофимов, 2009; Караванова, 2009], что почвенный раствор представлен несколькими энергетическими фракциями, каждая из которых удерживается в почве различными по природе и величине силами, обладает определенной спецификой состава и свойств. *Целью работы* являлось изучение, зависимости между капиллярно-сорбционным давлением почвенной влаги и химический составом, а также кислотностью различных энергетических фракций почвенных растворов, извлекаемых методами центрифугирования и отпрессовывания в диапазоне продуктивной влаги для дерново-подзолистой супесчаной почвы, загрязненной Zn

Методы

Объектами исследования служили почвенные растворы, которые извлекались из дерново-подзолистой супесчаной окультуренной почвы, загрязненной Zn, после окончания вегетационного опыта с многократной ротацией (всего 4 цикла по 30 сут.) тест-культуры ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский-85. Почву из вегетационных сосудов-лизиметров отбирали при $W(\text{г/г}) = \text{НВ}$. Выделяли почвенные растворы методами центрифугирования и отпрессовывания с помощью гидравлического пресса.

Для получения центрифужных растворов влажная почва в вегетационных сосудах-лизиметрах постепенно подсыхала на воздухе в лабораторных условиях в течение 12 дней до $W(\text{г/г}) = 10\%$ ($\approx 1.3 \text{ ВЗ}$) и, по мере высушивания, из почв извлекались квазиравновесные



почвенные растворы при давлении влаги в центрифугируемом образце за счет центробежной силы, соответствующем капиллярно-сорбционному давлению $F = 12900$ см водн.ст. ($pF = 4.1$). Процедуру повторяли ежедневно. Прессовые растворы последовательно отжимали с

помощью гидравлического пресса из каждого образца почвы [$W(\text{г/г}) = \text{НВ}$ (2 сут.)], помещенного в специально сконструированный толстостенный цилиндр из нержавеющей стали в диапазоне капиллярно-сорбционного давлений, $F: 330 \div 28000$ см водн.ст. ($pF: 2.52 \div 4.45$). В полученных образцах почвенных растворов определяли значения pH и концентрации макро- и микроэлементов, включая Zn , методом ICP-OES.

Результаты

Закономерности изменения кислотности центрифужных почвенных растворов, извлеченных из почв варианта «Ячмень» и «Черный пар» от влажности представлены на рис. 1. Анализ объединенной выборки данных, по содержанию Ca , Mg , Mn , Zn , K и Na в почвенных растворах, полученных в вариантах «Ячмень» и «Черный пар» (рис. 2), позволил обнаружить обратную степенную регрессионную зависимость (рис. 2): $[Me] = a \times pH_{\text{поч.р.}}^{-b}$ ($R^2 = 0.40 - 0.85$). Для Fe аналогичной зависимости обнаружить не удалось. Все отмеченные закономерности находятся в строгом соответствии с теорией, связывающей подвижность ионных форм элементов с ионными потенциалами последних.

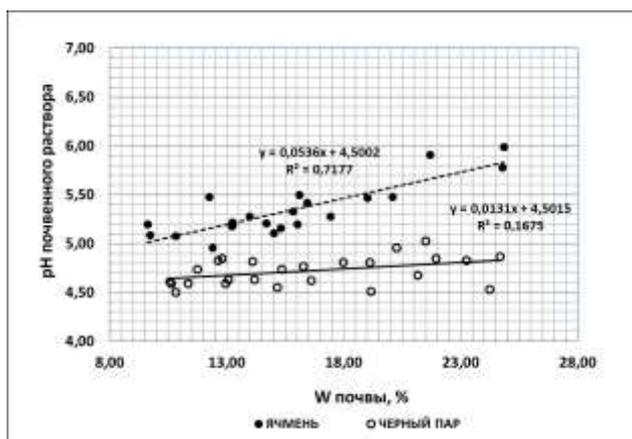


Рис. 1. Зависимость кислотности квазиравновесных почвенных растворов от влажности почв.

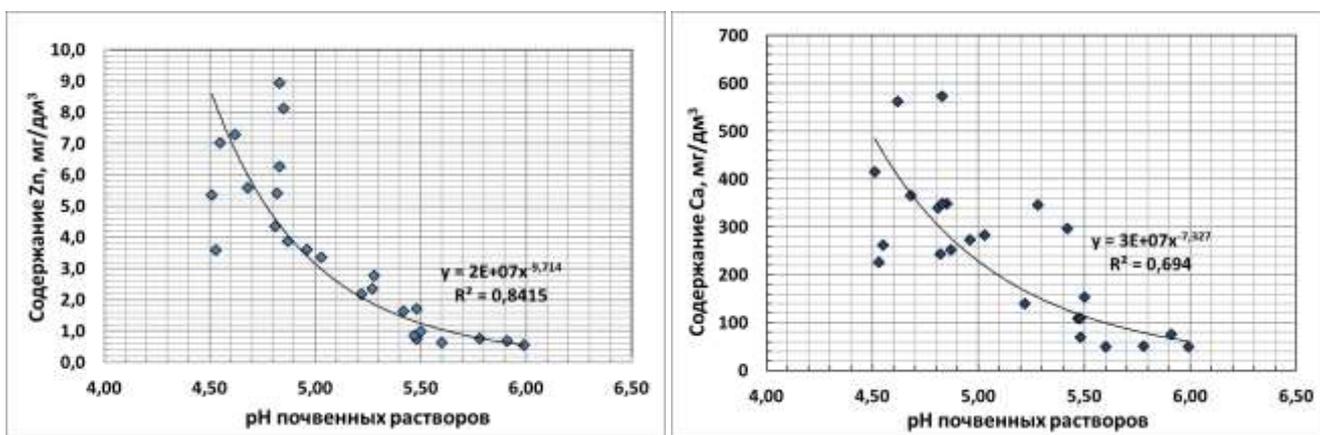


Рис. 2. Зависимость содержания Ca и Zn в почвенном растворе от величины pH



Полученные данные по зависимости концентрации исследуемых элементов в квазиравновесных почвенных растворах от влажности почвы представлены на рис. 3. Зависимости содержания исследуемых элементов (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, K и Na) в почвенных растворах от влажности установить не удалось. Однако, в более кислых растворах варианта «Черный пар» концентрация Ca, в среднем, в 2.5 раза превышала концентрацию металла в растворах варианта «Ячмень» во всем диапазоне исследуемой влажности почв. Для Mg, Mn, Zn и K данные величины составляли, соответственно, 2.4, 6.9, 4.5 и 2.7 раза. Различия были достоверны на уровне значимости $p = 0.05$.

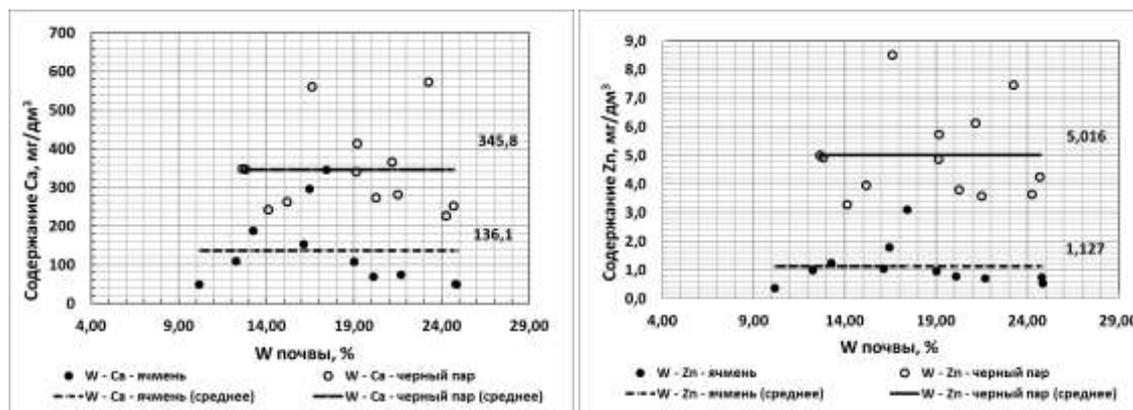


Рис. 3. Зависимость содержания ионов Ca и Zn в почвенном растворе от влажности почвы

Для Na отношение средних значений концентраций металла в растворах вариантов опыта «Черный пар» и «Ячмень» были равны 1.4 и были недостоверны на уровне значимости $p = 0.05$. Таким образом, кислотность почвенных растворов оказывает существенное влияние на их химический состав: при повышенной кислотности возрастает десорбция в почвенный раствор щелочных, щелочноземельных элементов, и также микроэлементов, присутствующих в растворах в степени окисления (+2).

Зависимость $F_{к-с}$ последовательно отпрессовываемых энергетических фракций почвенных растворов от влажности исследуемой почвы, а также установленные для этих растворов зависимости $pF - pH$ представлены на рис. 4. Как для варианта «Ячмень», так и для варианта «Черный пар» наблюдалась отчетливо выраженная положительная корреляционная связь между pF и pH . Полученные данные по зависимости концентрации исследуемых элементов Ca и Zn в почвенных растворах от влажности почвы представлены на рис. 5. Зависимости $pH - [Me]_{почв.р-р}$, причем разнонаправленные, удалось установить только для Zn ($[Zn]_{почв.р-р} = -0.18pH + 1.45$, $R^2 = 0.71$) и для Mn ($[Mn]_{почв.р-р} = 8.51pH - 46.8$, $R^2 = 0.45$). Для остальных элементов (K, Na, Ca, Mg, Fe) связи между pH и $[Me]_{почв.р-р}$ обнаружить не удалось. Сказанное выше справедливо и для зависимостей $pF - [Me]_{почв.р-р}$ (рис. 5). Для последовательно извлекаемых прессовых растворов варианта «Черный пар» (более кислых), наоборот, были получены достоверные зависимости концентрации двухвалентных элементов Ca, Mg и Zn в квазиравновесных почвенных растворах от величины pH и pF почвенных растворов (рис. 6). В то же время, для Mn, K и Na подобных зависимостей не обнаружено. Возможно, это связано с недостаточным количеством накопленных для статистической обработки данных. В целом же, концентрации двухвалентных элементов Ca, Mg, Zn в энергетических фракциях почвенных растворов, последовательно отпрессовываемых из более кислой почвы варианта «Черный пар», в среднем, в 3.7, 3.0 и 6.4 раза соответственно превышали концентрацию металлов в аналогичных фракциях растворов варианта «Ячмень».



Mn резко выделялся из общей картины: концентрация его в растворах, извлеченных из почв обоих вариантов практически не различалась. Концентрации одновалентных K и Na во фракциях прессовых растворов варианта «Черный пар» в среднем превышали аналогичные показатели варианта «Ячмень» в 8.5 и 3.3 раза.

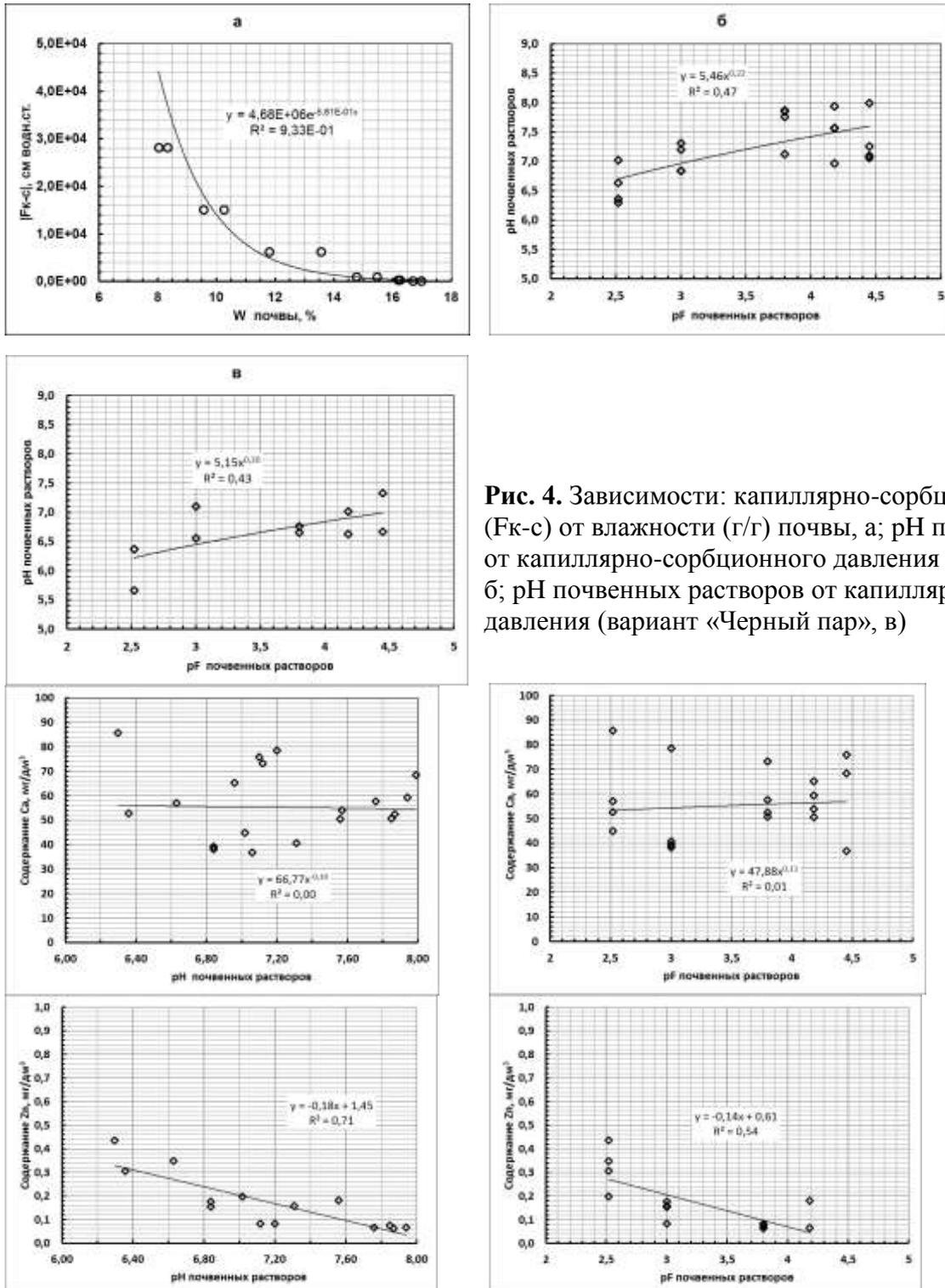


Рис. 4. Зависимости: капиллярно-сорбционного давления (F_k-c) от влажности (г/г) почвы, а; pH почвенных растворов от капиллярно-сорбционного давления (вариант «Ячмень»), б; pH почвенных растворов от капиллярно-сорбционного давления (вариант «Черный пар»), в)

Рис. 5 Зависимость содержания ионов Ca и Zn от величины pH и капиллярно-сорбционного потенциала почв (вариант «Ячмень»)

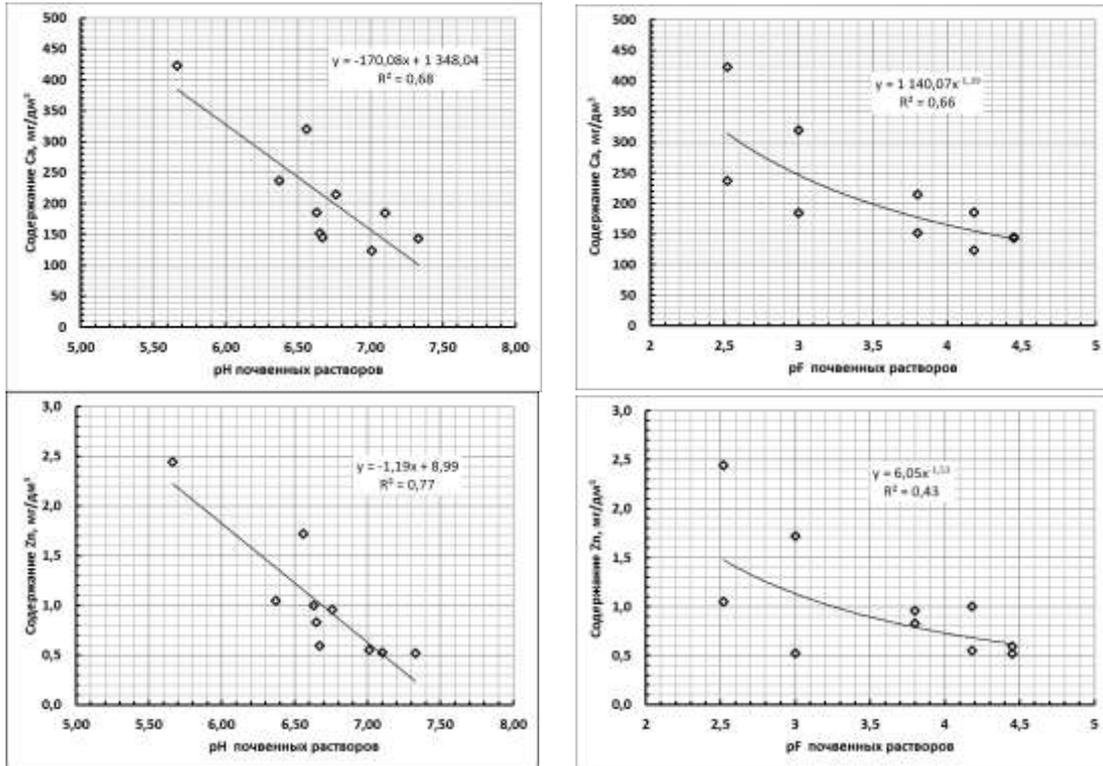


Рис. 6. Зависимость содержания ионов Ca и Zn от величины pH и капиллярно-сорбционного потенциала почв (вариант «Черный пар»)

Заключение.

В более кислых центрифужных растворах варианта «Черный пар» концентрация Ca, Mg, Mn, Zn, K и Na, в среднем, в 1.4–6.9 раз превышала концентрацию металлов в растворах варианта «Ячмень» во всем диапазоне исследуемой влажности почв. Установлено, что концентрации основных макро- и микроэлементов в почвенных растворах, отобранных из почв разных вариантов опыта в пределах диапазона продуктивной влаги не зависят от влажности почвы. Это существенно упрощает решение ряда задач по моделированию поведения химических элементов в системе почва-с/х растения. Для отпрессовываемых растворов из почв обоих вариантов наблюдалась отчетливо выраженная положительная корреляционная связь между rF и pH. Концентрации Ca, Mg, Zn, K и Na в последовательно отпрессовываемых фракциях почвенных растворов из более кислой почвы варианта «Черный пар», в среднем, в 3.3 – 8.5 раз превышали соответствующие концентрации металлов в аналогичных фракциях растворов варианта «Ячмень».



УДК 631.439

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ДО И ПОСЛЕ ПЛАНИРОВКИ

Басевич В.Ф., Витязев В.Г., Макаров И.Б., Сапожников П.М.

Факультет почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия, basevictor@yandex.ru

Annotation: It is shown that the specific surface area of chestnut soil at the initial stage of its development after planning is reflected in the features of the morphological organization of emerging new profiles. The profile distribution of the values of this indicator largely depends on the content of organic matter in the bulk material, as well as on the presence of individual morphons of the loamy component in the material. For all the cases under consideration, there is a significant predominance of the values of the inner surface over the outer one.

В условиях поливного земледелия для более рационального и эффективного использования оросительных вод и применяемой при этом дождевальной техники следует проводить планировку почвы – технологическую операцию по выравниванию ее поверхности. Необходимость данного мероприятия диктуется также стремлением создать относительно одинаковые условия для развития культурных растений с целью увеличения их урожайности. Безусловно, при этом происходит серьезное вмешательство в функционирование почвенного компонента агроценоза, неизбежное при планировке поверхности мощными мелиоративными машинами и специальными почвообрабатывающими орудиями. Особенно сильному воздействию подвергается верхняя плодородная часть почвы, что приводит в результате происходящих педотурбационных процессов к изменению морфологической организации почвенных профилей и находит соответствующее отражение в ряде показателей. Среди последних большое значение имеет поведение такой в известной мере интегральной величины, как удельная поверхность почвы. Она, как известно, характеризует дисперсное состояние почвы и связана с ее минералогическим и гранулометрическим составами, содержанием и качеством гумуса, величиной емкости поглощения и составом поглощенных катионов и некоторыми другими параметрами.

Исследования проводились на Быковской опытной станции Волгоградской области. Почвенный покров района исследований представлен каштановыми супесчаными пылеватыми почвами, развитыми на карбонатных породах. Изменения в почвенном покрове изучались путем сравнения спланированных под полив участков пахотных почв с их естественными аналогами. На спланированном участке были заложены две отличающиеся между собой площадки (I и II), на каждой из которых отбирались образцы из 10 разрезов. Выбор места для площадок определялся исходя из визуально оцениваемой неоднородности почвенного покрова. Для проведения сравнительного анализа был заложен разрез на целинной почве в лесополосе около спланированного участка поля. Отбор почвенных образцов производился послойно через каждые 10 см с учетом их принадлежности к тому или иному генетическому горизонту.

Следует пояснить, что верхняя, примерно полуметровая толща изученной каштановой почвы, находящейся длительное время в относительно ненарушенном состоянии в лесополосе, представлена супесчаным материалом горизонта А, который подразделяется на три подгоризонта (морфона): А' (0-12 см), А'' (12-40 см), А''' (40-52 см), отличающихся между собой по мощности, цвету, плотности и структуре. Нижележащий горизонт В в свою очередь также подразделяется по ряду признаков на три морфона: В1 (52-81 см), В2 (81-100 см) и В3 (100-121 см). Его окраска сменяется от каштаново-палевой в морфоне В1 до светло-каштановой в В2 и В3. По гранулометрическому составу материал морфонов В1 и В2



является легким суглинком. Именно в данном горизонте отмечается большое скопление карбонатных новообразований в виде белоглазки (появляется уже ниже 52 см в морфоне В1), белесых пятен и светло-белесоватых пропиток, выцветов и мицелярных прожилок. Супесчаная почвообразующая порода по сравнению с вышележащей толщей характеризуется заметным снижением содержания карбонатов и более светлыми и однородными тонами в окраске – от белесовато-светло-каштановой в морфоне С1 (121-148 см) до белесовато-светло-палевой и светло-палевой в морфонах С2 (148-171 см) и С3 (171-185 см) соответственно. Выделяемый в профиле горизонт Д (185-205 см) характеризуется светло-палевой окраской (чуть темнее вышележащего С3), бесструктурностью, рыхлостью и песчаным гранулометрическим составом.

Анализ распределения величин удельной поверхности (S м²/г) в профиле целинного аналога показывает определенную его дифференциацию, которая в целом отвечает морфологической организации слагающего его почвенного материала. Максимальные значения приурочены к морфону В1, где величины внешней (S_e), внутренней (S_i) и полной ($S_{пол}$) поверхностей соответственно равны 6, 68 и 74 м²/г. Вероятнее всего, это связано с более тяжелым (легкий суглинок) по сравнению с другими горизонтами материалом данного морфона, что приводит к увеличению содержания илистой фракции, способствующей в свою очередь увеличению удельной поверхности почвы. Характерной особенностью изученных почв является существенное преобладание значений внутренней поверхности над внешней. Если величины S_i измеряются единицами м²/г, то величины S_e – десятками м²/г. С глубиной отмечается определенное увеличение значений внешней поверхности, т.к. естественным образом снижается содержание гумуса и происходит заметное накопление карбонатов. Оба этих параметра способствуют снижению величин S_i – в среднем такое снижение на глубине 100 см может достигать до 30-40 м²/г по сравнению с 60-70 м²/г в верхней 30-см толще.

Величина полной удельной поверхности на спланированной площадке I в слое 0-20 см характеризуется незначительным колебанием и составляет в среднем 76 м²/г. Минимум приурочен к одной из точек на глубине 10-20 см – 59 м²/г. С увеличением глубины в большинстве случаев наблюдается резкое снижение величины $S_{пол}$ по сравнению с вышележащими слоями. По всей видимости, такое резкое изменение величины удельной поверхности обусловлено, с одной стороны, маломощностью нанесенного при планировке гумусового слоя, а с другой – тем, что покоится он в пределах данной площадки в основном на материале горизонта С, обладающем крайне невысокой величиной удельной поверхности. При смене генетической принадлежности подстилающего материала (морфонов А''' и В2) отмечается и более постепенное снижение $S_{пол}$ – в отдельных точках опробования на глубине даже 50-60 см она остается в пределах достаточно высоких значений 66-80 м²/г. Отмеченные изменения в величинах полной удельной поверхности происходят в основном за счет доли внутренней удельной поверхности, т.к. колебания S_e на фоне их низких абсолютных значений оказываются совсем незначительными. Высокие значения $S_{пол}$ при этом могут определяться также увеличением в морфонах горизонта В содержания минералов с хорошо развитой внутренней поверхностью, в первую очередь, группы монтмориллонита. В целом характерной чертой данного спланированного участка является существенный разброс данных в разных точках для одинаковых глубин. Это обстоятельство связано со спецификой планировочных работ, выполненных не на должном уровне и приведшем к формированию почвенных профилей с залеганием на одинаковых глубинах различного в генетическом отношении материала.

Изменение полной удельной поверхности на спланированном участке площадки II на глубине 0-20 см более равномерное, чем на площадке I. Среднее значение величины удельной



поверхности для этого участка поля равняется $79 \text{ м}^2/\text{г}$, с минимумом в одной из точек $69 \text{ м}^2/\text{г}$ и максимумом – $88 \text{ м}^2/\text{г}$. С увеличением глубины на этом участке поля также наблюдается постепенное снижение величин полной удельной поверхности за единственным исключением в двух точках, где в профиле идентифицируется смесь материала различных генетических горизонтов. В этих местах по всему профилю наблюдается отсутствие всякой закономерности в поведении величин как $S_{\text{пол}}$, так и S_i . В других случаях, напротив, отмечается незначительное колебание значений полной и внешней удельной поверхности вплоть до глубины 70 см.

Характеризуя спланированные участки поля в целом, необходимо отметить, что наибольшие значения полной, внутренней и внешней поверхностей приурочены к верхней части профиля. Очевидно, это объясняется более высоким содержанием гумуса в верхнем насыпном (пахотном) слое рассматриваемых почв, а также распределением его по профилю. Не исключено также, что известное влияние на это оказывает и содержание в профиле изученных почв илистой фракции, точнее специфика ее распределения в пределах профиля и способность увеличивать удельную поверхность при увеличении ее содержания в отдельных горизонтах. При этом следует помнить, что гумус, в силу своего структурного строения, способствует увеличению, главным образом, внешней поверхности. Именно максимум этой величины и приходится на верхний насыпной (гумусовый) слой. Во многих точках на всю глубину насыпного слоя полная удельная поверхность остается одной и той же или изменяется очень незначительно – в пределах $2-5 \text{ м}^2/\text{г}$. Аналогичная картина наблюдается в насыпном слое и с внешней удельной поверхностью, которая остается более или менее постоянной, а если изменяется, то на незначительную величину. В то же время в отдельных точках спланированных участков отмечается некоторое несоответствие в показателях удельной поверхности по сравнению с относительно ненарушенной почвой лесополосы. Так гумусированный материал верхней толщи целинного аналога может характеризоваться более низкими величинами полной удельной поверхности, чем насыпной материал с меньшим содержанием органического вещества. Отчасти это может объясняться наличием в этих местах примесей более тяжелого материала морфона В2.

Резкое снижение величины внутренней удельной поверхности исследуемых почв с глубиной, вероятно, связано с высоким содержанием в материале этих горизонтов минералов с плохо развитой внутренней поверхностью – каолинит, галлуазит, иллит. Необходимо также отметить, что в исследуемой почве спланированных участков, как и в целинном аналоге, величины внутренней поверхности существенно выше по сравнению со значениями внешней поверхности.

Таким образом, в первые годы после планировки поверхности каштановой почвы величины удельной поверхности в значительной мере следуют возникшим особенностям морфологической организации почвенных профилей в каждой из отдельных опробованных точек. При этом удельная поверхность материала пахотного слоя спланированных почв в отдельных точках оказывается выше по сравнению с ее величиной в гумусовом горизонте целинного аналога. Наибольшие значения общей, внутренней и внешней поверхностей в спланированной почве приурочены к верхней части профиля и в среднем величина полной удельной поверхности равняется здесь $76-79 \text{ м}^2/\text{г}$. Многие особенности в профильном распределении величин удельной поверхности объясняются также наличием смесей материала различных генетических горизонтов, включающих различное содержание в них органического вещества и имеющих различный гранулометрический состав слагающих их частей.



УДК 631.435* 631.416.8

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ РОСТОВА-НА-ДОНУ

Безуглова О.С., Горбов С.Н., Сальник Н.В., Тагивердиев С.С.

¹Южный федеральный университет

osbesuglova@sfedu.ru; sngorbov@sfedu.ru; n.salnik.w@yandex.ru; stagiverdiev@sfedu.ru

PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION AND ACCUMULATION REGULARITIES OF HEAVY METALS
IN ROSTOV-ON-DON SOILS

Bezuglova O.S., Gorbov S.N., Salnik N.V., Tagiverdiev S. S.
The Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Annotation: The surface horizons of the soils of traffic areas of Rostov-on-Don are characterized almost twice higher content of soil particles from 1 mm to 0,01 mm than native chernozems. The higher anthropogenic load provides the higher the content of sand fractions in the particle-size distribution. The accumulation of HM in urban soils of roadside areas is relatively small, which is also due to a decrease of the soil sorption capacity.

Введение

В Южном Федеральном округе Российской Федерации г. Ростов-на-Дону является одним из двух городов-миллионников. Он характеризуется развитой инфраструктурой, высоким автомобильным трафиком и насыщенностью промышленными предприятиями различного профиля. Все это предопределяет высокую вероятность накопления в почвах города поллютантов, в том числе и тяжелых металлов. Закономерности этого накопления обуславливаются как местоположением почвы относительно загрязняющего объекта, так и внутренними свойствами почв, формирующими их сорбционную емкость. Антропогенное воздействие на почву в условиях урбозкосистем влечет за собой изменение даже такого стабильного показателя, как гранулометрический состав, как следствие, трансформируются и остальные свойства почв, в том числе и химические. Гранулометрический состав, таким образом, во многом определяет количественные характеристики накопления токсикантов в почве. Поэтому сопряженное изучение этих двух показателей – гранулометрический состав почвы и содержание в ней основных загрязняющих веществ – представляет теоретическую и практическую значимость.

Объекты и методы

Диагностическим горизонтом городских почв является синлитогенный горизонт урбик (UR), представляющий собой рыхлые наслоения со значительным включением антропогенного материала на почвах естественного сложения, нередко в той или иной степени трансформированными предыдущими стадиями функционирования в условиях города. Для данной работы было отобрано 45 поверхностных образцов из горизонта урбик во всех функциональных зонах города. Глубина отбора составляла 10—15 см, смешанный образец формировался из нескольких точечных проб в выбранной точке исследования с помощью агрохимического бура. Статистический анализ полученных результатов проводили с образцами, сгруппированными в кластеры с учетом функциональных зон города. Для уточнения профильных закономерностей были заложены разрезы с отбором проб по генетическим горизонтам.



Гранулометрический состав определяли во всех образцах методом пипетирования по Качинскому с подготовкой почвы с пирофосфатом натрия. Тяжелые металлы (валовое содержание) определяли с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Спектроскан МАКС-GV (ПНД Ф 16.1.42).

Результаты и обсуждение

Среднестатистический гранулометрический состав горизонта урбик почв придорожной полосы представлен в таблице 1. Данные свидетельствуют, что для естественных почв Ростова-на-Дону – черноземов обыкновенных карбонатных (миграционно-сегрегационных) – наличие песчаных частиц не характерно (Безуглова, Хырхырова, 2008). И если аномально высокое содержание песчаных фракций в горизонте урбик Левобережья можно объяснить их расположением в пойме Дона, то в остальных случаях явно сказывается антропогенное влияние: использование песка в антигололедных смесях и в дорожном строительстве, а часто и простое разбрасывание песка во время гололеда. Соответственно, снижается доля таких обычных для почв Приазовья компонентов гранулометрического состава, как лессовидная фракция, илстые частицы и в целом физической глины. Почвы из типичных для региона легкоглинистых переходят в среднесуглинистую разновидность.

Таблица 1. Среднестатистический гранулометрический состав поверхностного горизонта урбик в почвах придорожной полосы функциональных зон города Ростова-на-Дону

| Размер фракции в (мм) и ее содержание в (%), $M \pm m$ | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 1-0,25 | 0,25-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 | 0,005-0,001 | < 0,001 | <0,01 | >0,01 |
| Рекреационная зона | | | | | | | |
| 6,8±1,8 | 24,5±5,2 | 27,0±0,7 | 6,0±0,6 | 9,4±1,8 | 26,3±4,0 | 41,7±6,4 | 58,3±6,4 |
| Селитебная зона | | | | | | | |
| 10,8±1,8 | 25,3±1,0 | 24,4±0,4 | 6,0±0,1 | 9,7±0,4 | 23,8±1,7 | 39,5±2,3 | 60,5±2,3 |
| Промышленная зона | | | | | | | |
| 16,5±0,4 | 28,6±4,0 | 21,0±0,9 | 5,8±0,3 | 6,0±1,4 | 22,2±1,0 | 33,9±2,7 | 66,1±2,7 |
| Левобережье | | | | | | | |
| 11,6±6,7 | 33,6±20,5 | 20,4±1,5 | 5,2±1,6 | 8,2±4,8 | 21,0±5,8 | 34,4±12,3 | 65,6±12,3 |
| Среднестатистические данные для черноземов обыкновенных карбонатных (миграционно-сегрегационных) среднесуглинистых (Безуглова, Хырхырова, 2008), лимиты | | | | | | | |
| 0,0-0,0 | 0,0-0,1 | 30,1-33,7 | 27,3-29,7 | | 33,0-39,5 | 62,1-66,8 | 33,2-37,9 |

Высокие концентрации ТМ приурочены к промышленной зоне, именно здесь обнаружено наибольшее содержание Mn, Co, Zn, Sr, Pb (табл. 2). Но превышение ОДК зафиксировано только по цинку, причем загрязнение этим металлом отмечается не только в промышленной зоне водораздельной территории города, но и в левобережной части. Однако для некоторых металлов ОДК разработаны с учетом гранулометрического состава и при данной ситуации, когда среднестатистический гранулометрический состав тяготеет к характеристикам легких почв, вероятно, имеет смысл ориентироваться на более строгие рекомендации. С учетом этого оценка загрязнения почв такими металлами как цинк, свинец, медь меняется: отмечено превышение ОДК по цинку в 3–5 раз по всему городу, по свинцу – валовое содержание выше ОДК по всему городу, при этом в промышленной зоне – почти в 2 раза.



Таблица 2. Среднестатистическое валовое содержание тяжелых металлов в поверхностном горизонте урбик в почвах придорожной полосы функциональных зон города Ростова-на-Дону

| Элементы, М ±m, ppm | | | | | | | |
|--|------------|--------------|-----------|------------|------------|-------------|------------|
| V | Cr | Mn | Co | Ni | Cu | Zn | Pb |
| Рекреационная зона | | | | | | | |
| 89,3 ±7,9 | 100,1 ±6,7 | 652,6 ±50,8 | 11,8 ±1,4 | 32,3 ±4,2 | 37,4 ±2,9 | 209 ±38,4 | 41,1 ±11,2 |
| Селитебная зона | | | | | | | |
| 92,8 ±4,1 | 94,9 ±4,3 | 661,7 ±26,8 | 11 ±0,8 | 38,22 ±1,9 | 38,22 ±1,6 | 161,1 ±17,9 | 33,8 ±27,7 |
| Промышленная зона | | | | | | | |
| 83 ±8,2 | 93 ±7,3 | 682 ±59,8 | 12 ±12,3 | 32,25 ±4,1 | 38,5 ±2,2 | 284,1 ±76,3 | 62,4 ±20,2 |
| Левобережье | | | | | | | |
| 79,66 ±5,3 | 102,6 ±8,9 | 586,3 ±246,5 | 9,68 ±0,9 | 28,2 ±3,8 | 33,35 ±2,6 | 274,2 ±77,7 | 55,6 ±21,4 |
| ОДК (ГН 2.1.7.2511-09) для тяжелых почв/ для песчаных и супесчаных почв | | | | | | | |
| 150 | 100 | 1500 | 50 | 80/20 | 132/33 | 220/55 | 130/32 |
| Фоновое содержание (Акимцев и др., 1962) | | | | | | | |
| 67 | 100 | - | 8 | 45 | 30 | 65 | 20 |

Сопоставление полученных результатов с фоновыми содержаниями изучаемых элементов, за которые приняты данные, опубликованные в 1962 году В.В. Акимцевым с соавторами, показало, что превышение фона, которое также свидетельствует о накоплении токсикантов, обнаружено по всем металлам, кроме хрома и никеля (таблица 3).

Таблица 3. Коэффициенты накопления тяжелых металлов в горизонтах урбик почв придорожных территорий г. Ростова-на-Дону

| V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Pb |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Рекреационная зона | | | | | | |
| 1,33 | 1,0 | 1,48 | 0,72 | 1,25 | 3,22 | 2,06 |
| Селитебная зона | | | | | | |
| 1,38 | 0,95 | 1,38 | 0,85 | 1,27 | 2,48 | 1,69 |
| Промышленная зона | | | | | | |
| 1,24 | 0,93 | 1,5 | 0,72 | 1,28 | 4,37 | 2,12 |
| Левобережье | | | | | | |
| 1,19 | 1,03 | 1,21 | 0,62 | 1,11 | 4,22 | 2,78 |

Причем если по кобальту и меди оно невелико, то по свинцу даже в наиболее чистой селитебной зоне коэффициент накопления составил 1,69, а в наиболее загрязненной промышленной – 2,12, что связано с поступлением свинца в придорожные территории из выхлопных газов автомобилей. Значительное превышение фоновой концентрации- отмечено и по цинку. Коэффициент накопления составил в рекреационной зоне 3,22, в промышленной – 4,37, что обусловлено функционированием на территории города крупного лакокрасочного предприятия ОАО «Эмпилс». Коэффициенты накопления по никелю меньше единицы, что свидетельствует о более низком содержании этого металла, чем в фоновых черноземах. Возможно, это сопряжено с облегчением гранулометрического состава городских почв, в отсутствии загрязнения территорий этим металлом, такое явление возможно. В пользу этого предположения говорит тот факт, что наиболее низкий коэффициент обнаружен в Левобережье, где самые легкие по гранулометрическому составу почвы.



Для оценки связи между такими важнейшими показателями состояния почвы, как гранулометрический состав и валовое содержание тяжелых металлов, были рассчитаны коэффициенты корреляции. В качестве показателя гранулометрического состава было выбрано содержание физической глины, так как она обладает высокой сорбционной емкостью и вероятность накопления ТМ в ней, выше, чем в физическом песке. Оказалось, что зависимость между этими показателями для поверхностного горизонта почв придорожных территорий чаще обратная, о чем свидетельствует знак минус коэффициента корреляции. Учитывая значительное увеличение в почве придорожных территорий песчаной фракции, свидетельствующее об антропогенном воздействии на почву, и позволяющее расценивать песок как загрязняющий элемент, можно сделать вывод о поступлении ТМ именно с этими фракциями физического песка, и ослаблении роли физической глины. Высокая и очень высокая сила связи обнаружена между изучаемыми компонентами в почвах рекреационной зоны, причем для V, Co, Ni, Mn связь оценивается как надежная ($t > 3$) при величине коэффициента корреляции в диапазоне от -0,76 до -0,86. Характерно, что именно по основным загрязняющим почвы нашего города элементам – цинку и свинцу – в рекреационной зоне обнаружена положительная связь, что свидетельствует о накоплении этих элементов тонкими фракциями. Однако сила связи невелика: слабая по цинку и средняя по свинцу, что обусловлено, вероятно, их преимущественным появлением в почве за счет антропогенного фактора. Во всех остальных зонах связь между изучаемыми показателями слабая или очень слабая, причем нет закономерностей и в характере связи, она может быть как прямой, так и обратной. В целом, можно с уверенностью сказать, что чем больше степень загрязнения, тем слабее сила связи, так как она определяется перечисленными выше внешними факторами, в том числе и случайными, и самые низкие коэффициенты корреляции обнаружены для почв промышленной зоны.

Рисунки 1 и 2 демонстрируют характер профильного распределения цинка и свинца в профиле урбостратозема и чернозема обыкновенного карбонатного. На рисунке 1 четко отмечен максимум в накоплении цинка, приуроченный к поверхностным горизонтам UR и Ad, отличаются только абсолютные значения – в горизонте урбик они выше. Закрепление цинка в почве происходит за счет образования легко обменных форм, связанных с органическим веществом (Попова и др., 2010). Далее вниз по профилю наблюдается достаточно четкая графическая корреляция в характере линий распределения физической глины и цинка, что говорит о значимой роли тонких фракций в закреплении этого металла.

Совершенно другой характер распределения по профилю изучаемых почв свинца. Отчетливо видно два максимума – один приурочен к поверхностному горизонту, второй – к горизонту наибольшего накопления карбонатов (C_{Ca}), соответственно графическая связь с физической глиной отсутствует. Известно, что в почвах, содержащих карбонаты, связывание элемента происходит в основном за счет осаждения церуссита $PbCO_3$. Почвенное органическое вещество также способно образовывать комплексы с ионами Pb^{+2} (Понизовский, Мироненко, 2001). И представленные на рис.2 кривые распределения свинца по профилю урбостратозема и чернозема четко иллюстрируют эти закономерности.

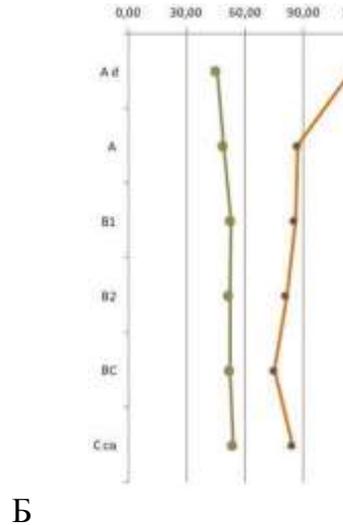
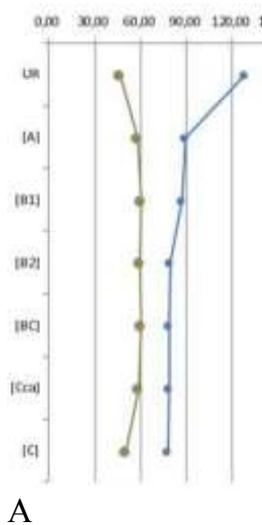


Рис. 1. Профильное распределение цинка и физической глины в урбостратоземе (А) и черноземе миграционно-сегрегационном (Б)

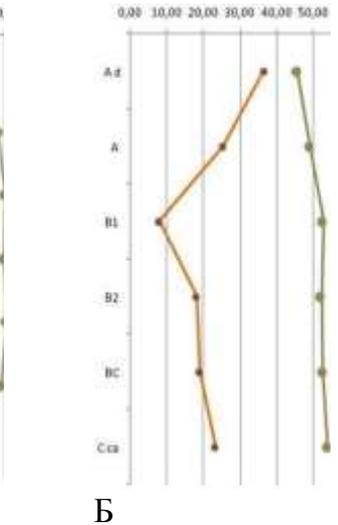
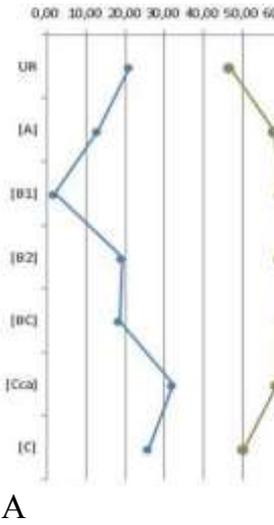


Рис. 2. Профильное распределение свинца и физической глины в урбостратоземе (А) и в черноземе миграционно-сегрегационном (Б)

Выводы

В поверхностных горизонтах урбик придорожных зон Ростова-на-Дону содержание физического песка выше, чем в нативных черноземах, почти в два раза. И чем больше антропогенная нагрузка, тем выше содержание песчаных фракций в гранулометрическом составе. Увеличение в два раза содержания физического песка в гранулометрическом составе почв придорожных зон города обуславливает снижение сорбционной емкости почв и способности связывать токсические вещества в малоподвижные формы, что снижает протекторную роль этих зон в различных частях города по отношению к окружающей среде. Накопление ТМ в почвах придорожных территорий сравнительно невелико, что также обусловлено снижением сорбционной емкости почвы. Значительное превышение ОДК обнаружено только по цинку и свинцу, причем чем выше уровень загрязнения, тем корреляция между гранулометрическим составом и содержанием ТМ слабее, что обусловлено влиянием на степень накопления химических элементов внешних факторов.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках Инициативного научного проекта базовой части госзадания Минобрнауки России (шифр 6.6222.2017/8.9) и при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-3464.2018.11).

Литература

1. Акимцев В.В., Болдырева А.В., Голубев С.Н. Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1962. С. 38–41.
2. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
3. Понизовский А. А., Мироненко Е. В. Механизмы поглощения свинца (Pb) почвами. Почвоведение, 2001, № 4, с. 418-429
4. Попова Л.Ф., Репницына О.Н., Никитина И.В. Трансформация подвижных форм цинка в почвах г. Архангельска. Arctic Environmental Research, 2010, с.65-71.



УДК 631.435* 631.416.8

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ

Болдырева В.Э., Морозов И.В., Безуглова О.С.

¹Южный федеральный университет
maskow@mail.ru, migovad@sfedu.ru, osbesuglova@sfedu.ru

INTERPRETATION OF THE RESULTS OF THE DETERMINATION OF PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION BY
SOIL BY THE METHOD OF LASER DIFFRACTION

Boldyreva V.E., Morozov I.V., Bezuglova O.S.
The Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Annotation: An analysis of discrepancies in methodological approaches and in determining the boundaries of the main textural classes in the classifications of N.A. Kaczynski (Russia), USDA, WRB. Existing disagreements in the diagnosis of the soil on its particle-size distribution are reflected in the name of the soil.

Введение

Гранулометрический состав почвы, являясь генетической характеристикой, определяющей ее фундаментальные свойства и черты, задает направление и характер исследований. Нельзя пренебречь важностью этих исследований на всех этапах изучения элементарных почвенных частиц (ЭПЧ), начиная от классификационных построений и принципов, на которых они основаны, заканчивая способами пробоподготовки и учета количества фракций. Особенно важным представляется нам это сейчас, когда происходит всеобщая глобализация, объединение исследований и сил ученых многих стран. Все чаще отечественные и зарубежные ученые используют для своих научных целей метод лазерной дифрактометрии, и достижение взаимопонимания при интерпретации результатов определения гранулометрического состава почв, полученных данным методом, – одна из важных научных задач. Отсюда цель – провести сравнительный анализ подготовки почвы к гранулометрическому анализу, количественного учета ЭПЧ по фракциям, и особенностей интерпретации результатов в отечественном и зарубежном почвоведении.

Объекты и методы

Для достижения этой цели нами были исследованы классификационные построения и их эволюция в различных шкалах ЭПЧ, применяемых учеными из России, США и стран Европы. В основе исследований лежит анализ не только классификационных особенностей, способов пробоподготовки и учета, но и разного понимания природы ЭПЧ, и принципов выделения основных текстурных классов, разделения их на подклассы и варьирования ширины их границ. Проведение сравнительного анализа классификаций возможно только в случае сопоставимости объектов классификационных построений, методов пробоподготовки, методов количественного учета, результатов исследований, а в конечном итоге, и объектов дефиниций.

Нами были исследованы 57 индивидуальных почвенных образцов чернозема обыкновенного карбонатного. Эксперимент проводили в несколько этапов:

1. Этап подготовки почвы к анализу – был выбран метод Качинского в модификации Долгова-Мичмановой, поскольку он позволяет учитывать ЭПЧ различной природы,



механические, что важно для классификаций США и Великобритании, а также сохранить частицы органо-минеральной и органической природы, что необходимо для отечественной классификации;

2. Этап количественного учета ЭПЧ по фракциям – был выбран метод лазерной дифракции (оборудование «Analysette 22 NanoTec», ISO 13320-1:1999). Этот метод достаточно широко используется в практике производства гранулометрического анализа почв, как отечественными [Шейн и др., 2006; Хазарьян, 2013; Болдырева и др., 2019], так и зарубежными исследователями [Makó G. Tótha et al., 2017; Ryzak, M. & Bieganski, 2011]. Это обусловлено объективностью инструментального метода, позволяющего уверенно контролировать длительность диспергирования, процесс измерения, дает хорошую сходимости результатов параллельных измерений. Важно то, что выбранный нами метод принципиально не связан ни с одной из сравниваемых классификаций, что на наш взгляд, позволяет использовать его в качестве независимого от сложившихся стереотипов.

3. Этап интерпретации результатов – проводили согласно следующим общепринятым классификациям: классификация почв по механическому составу Н.А. Качинского [Качинский, 1965]; классификация текстуры почвы Министерства сельского хозяйства США – USDA [Soil Survey Division Staff, 2017]; классификация Всемирной справочной базы почвенных ресурсов [IUSS Working Group WRB, 2015].

4. Этап сравнительного анализа схем и классификаций.

Результаты и обсуждение

Разночтения сравниваемых нами классификаций, отечественной и некоторых зарубежных, в частности, министерства сельского хозяйства США – United States Department of Agriculture (USDA) и всемирной справочной базы для почвенных ресурсов – World Reference Base for Soil Resources (WRB), в обобщенной форме представлены в таблице № 1.

Несогласованность проявляется не только в различных представлениях о природе ЭПЧ, но и в классификационных построениях, в основе которых лежит размер частиц. Однако наиболее существенные различия отмечаются не столько в размерности фракций и смещении границ текстурных классов, сколько в подходах к выполнению гранулометрического анализа почв, которые, в свою очередь, сказываются на изучении состава и свойств как самих ЭПЧ, так и на определении гранулометрического состава почв в целом.

Используя при интерпретации результатов гранулометрического анализа трехчленную классификацию, зарубежные ученые пренебрегают особенностями процесса почвообразования, который учитывает классификация Н.А. Качинского. Чтобы проиллюстрировать необходимость учета типа почвообразования при определении текстурного класса почвы, рассмотрим результаты гранулометрического анализа, полученные методом лазерной дифракции, для горизонта С чернозема обыкновенного карбонатного, который лежит глубоко (100—145 см) и, в силу этого, наименее подвержен влиянию окружающей среды. Интерпретация проводилась по классификации Н.А. Качинского, учитывающей тип почвообразования. Сумма частиц $<0,01$ % в исследуемом образце $65,09 \pm 1,06$, учитывая, что это степной тип почвообразования – получаем глину легкую, если бы это были подзолы, результаты интерпретировались бы как глина средняя, солонцы – глина тяжелая. Таким образом, при интерпретации экспериментальных данных выбор типа почвообразования оказывается решающим, так как в зависимости от этого параметра мы получаем разновидность текстурного класса глины от легкой до тяжелой. Тогда как по классификациям WRB и USDA, рассматриваемый образец оценивается как silt loam (суглинок пылеватый).



Таблица 1. Разночтения в классификациях почв по гранулометрическому составу Н.А. Качинского, по данным Всемирной справочной базы почвенных ресурсов (WRB) и министерства сельского хозяйства США (USDA)

| Классификация | | | | |
|--|------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| Н.А.Качинского | | USDA | | WRB |
| Объект гранулометрического анализа | | | | |
| Частицы минеральной, органоминеральной, органической природы | | Частицы минерального происхождения | | Частицы минерального происхождения |
| Граница между фракциями тонкого песка и пыли | | | | |
| 0,05 мм | | 0,05 мм (иногда 0,02 мм) | | 0,06 мм |
| Границы фракций | | | | |
| Наименование фракции | Размер фракций ЭПЧ, мм | | | Наименование фракции |
| Ил | < 0,001 | < 0,002 | < 0,002 | Clay |
| Мелкая пыль | 0,005-0,001 | | | |
| Средняя пыль | 0,01-0,005 | 0,05-0,002 | 0,063-0,002 | Silt |
| Крупная пыль | 0,05-0,01 | | | |
| Песок мелкий | 0,25-0,05 | 0,1-0,05 | 0,125-0,063 | Very fine sand |
| | | 0,25-0,1 | 0,20-0,125 | Fine sand |
| Песок средний | 0,5-0,25 | 0,5-0,25 | 0,63-0,20 | Medium sand |
| Песок крупный | 1,00-0,5 | 1,00-0,5 | 1,25-0,63 | Coarse sand |
| Гравий | 3,00-1,00 | 2,00-1,00 | 2,00-1,25 | Very coarse sand |

Сравнительный анализ полученных данных в контексте рассматриваемых классификаций показал, что, вследствие изменения градации илистой фракции, в зарубежных классификациях происходит увеличение ее количества в 1,5—2 раза. Количество общей пыли также имеет различия, поскольку сдвинута верхняя граница ила. Граница суммы песчаных фракций находится приблизительно на одном уровне в классификациях Н.А. Качинского, USDA и WRB, поэтому количество этой фракции при сравнении зачастую совпадает. Однако, если рассматривать различия по фракциям песка, ситуация несколько меняется, в силу более дробного деления на подклассы в классификации Н.А. Качинского. Вследствие изменения границ основных текстурных классов, а соответственно, и изменения количества ЭПЧ, составляющих эти классы, гранулометрический состав при диагностировании оценивается как более тяжелый, либо более легкий, в зависимости от того, какой классификационной системой пользуется исследователь. Естественно, что разночтения в названии не отражают реальное положение, так как в действительности количество ЭПЧ различных размеров в исследуемой почве не изменяется. Так, данные исследований, представленные на рисунке 1, показывают, что использование различных классификаций для диагностики одного и того же почвенного образца, характеризующегося одним и тем же относительным содержанием ЭПЧ, приводят к смещению текстурного класса в сторону утяжеления при интерпретации результатов анализа согласно зарубежным классификациям.

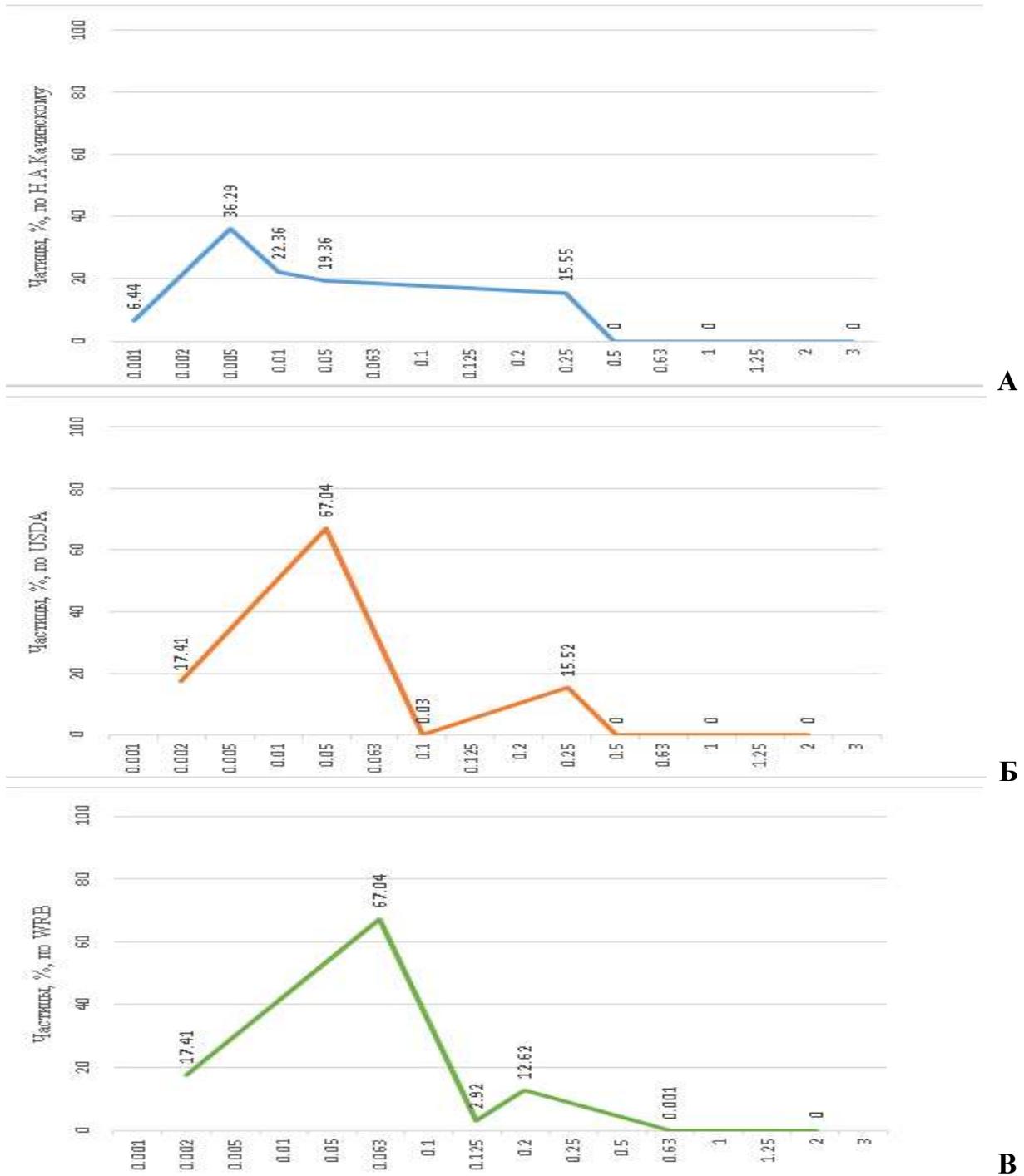


Рис. 1. Гранулометрический состав горизонта С чернозема обыкновенного карбонатного в контексте обсуждаемых классификаций: А – по Н.А. Качинскому; Б – по USDA; В – по WRB

Выводы

1. Отсутствие единых методических подходов к классификациям ЭПЧ является причиной разночтения в интерпретации результатов гранулометрического состава, полученных методом лазерной дифракции, поскольку под одним и тем же термином, например, «пыль – silt», имеются в виду различные не только по размеру, но и по природе частицы.



2. Преимуществом определения текстурных классов почвы по Н.А. Качинскому является учет условий почвообразования, так как пренебрежение ими приводит к ошибкам в диагностике почвы по гранулометрическому составу.
3. Встроенный программный комплекс лазерного дифрактометра позволяет оператору производить не только настройку измерений на любую классификационную шкалу, но и осуществлять пересчет ранее полученных результатов анализа в любом диапазоне границ «фракций». Это позволяет переводить полученные результаты фракционного состава ЭПЧ в любую классификационную шкалу. Важно, что данный метод принципиально не связан ни с одной из сравниваемых классификаций, и это позволяет использовать его в качестве независимого от сложившихся стереотипов.
4. Сравнительный анализ полученных данных показал, что различия в размерности фракции ила в зарубежных классификациях, по сравнению с отечественной, приводят к кажущемуся увеличению содержания данной фракции в 1,5—2 раза, а соответственно, утяжелению гранулометрического состава при определении текстурного класса, согласно зарубежным классификациям. Данное обстоятельство неизбежно отражается и на содержании фракции пыли.
5. Разногласия в диагностике почвы по ее гранулометрическому составу, обусловленные разночтениями в определении границ основных текстурных классов в классификациях Н.А. Качинского, USDA, WRB, отражаются в названии, тогда как реальное количество ЭПЧ различных размеров в образце не изменяется.

Литература

1. Болдырева В.Э., Безуглова О.С., Морозов И.В. К вопросу об определении гранулометрического состава почв с использованием метода лазерной дифракции // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, 2019. № 1(33). С. 184–194. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-184-194
2. Качинский Н.А. Физика почв. Ч.1. М.: Высшая школа, 1965. 324 с.
3. Хазарьян В.Э. Сравнительный анализ методов пипетки и лазерной дифракции // «Ломоносов-2013»: XX Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение», 8-12 апреля 2013 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения: Тез. докл. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 218–219.
4. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю., Молов А.З. Гранулометрический состав: роль органического вещества в различиях данных седиментометрического и лазерно-дифрактометрического методов // Доклады по экологическому почвоведению, 2006. № 1, вып. 1. С. 17—29.
5. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. World Soil Resources Reports 106, FAO, Rome 2015. 203 p.
6. Makó G. Tótha, Weynants M., Rajkai K., Hermannb T. & Tóth B. Pedotransfer functions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values // British Society of Soil Science. European Journal of Soil Science, 2017. V.68. P. 769—782.
7. Ryżak M. & Bieganowski A. Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser-diffraction method // Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2011. №174. – P. 624—633.
8. Soil Survey Division Staff Soil survey manual. United States Department of Agriculture, 2017. Issued March. 120 p.



УДК 631.4.

ОСНОВНАЯ РЕОЛОГИЧЕСКАЯ КРИВАЯ КАК ИНДИКАТОР МИКРОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТОЗЕМОВ

Бутылкина М.А.¹, Умарова А.Б.¹, Званцова В.А.¹, Сусленкова М.М.¹, Початкова Т.Н.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
m.butylkina@gmail.com

THE MAIN RHEOLOGICAL CURVE AS INDICATOR OF MICROSTRUCTURAL CONDITION OF SOIL
CONSTRUCTIONS

Butylkina M.A., Umarova A.B., Zvantsova V.A., Suslenkova M.M., Pochatkova T.N.
m.butylkina@gmail.com

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russian Federation

Annotation: The rheological behavior of different layers of soil constructions after 4 years functioning was investigated. Decrease in the strength of structural bonds in lower horizons of variant 1 and 2 was revealed. Changes in the shape of the rheological curves in individual layers of constructions indicate the transformation and redistribution of solid-phase components in their profile.

Введение

Между частицами внутри агрегатов и между агрегатами действуют разнообразные силы сцепления, определяющие прочность структуры, которые зависят от таких почвенных свойств, как гранулометрический состав, минералогический состав, состав органического вещества, влажность и др. (Markgraf et al., 2010, Markgraf et al., 2016). При внешнем воздействии в почве возникают внутренние напряжения. Если внешнее воздействие превышает внутренние силы сцепления между частицами, происходит разрушение структуры. Почва постоянно подвергается сдвиговым воздействиям со стороны почвенной биоты, корневой системы растений и сельскохозяйственных орудий. Возникающие при этом напряжения сдвига могут быть изучены в ходе реологических исследований. Почва может быть рассмотрена, как высококонцентрированная структурированная полидисперсная система (Урьев, 1980). Для этой системы зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ дает информацию о характере деформационного поведения почвы. Это, в свою очередь, позволяет оценить и сравнить прочность микроструктуры различных почв, например, путем расчета значений эффективной вязкости, изменение которой связано с изменением структуры системы (Кирсанов, Матвеев, 2016).

В натуральных экспериментах подобные исследования позволяют изучить процессы формирования почвенной микроструктуры и оценить изменение прочности структурных связей в ходе эволюции естественных и искусственно создаваемых почв. При создании почвенных конструкций важным вопросом является формирование оптимальной и устойчивой почвенной структуры как на макро-, так и на микроуровнях. Искусственно созданные насыпные почвенные слои претерпевают значительные изменения в первые годы своего функционирования (Умарова, Иванова, 2008). Под действием внешних факторов и в результате жизнедеятельности почвенной биоты происходит трансформация пространственной организации твердофазных компонентов, влияющая на дальнейшую устойчивость и продуктивность почвенных конструкций.



Объекты и методы

В 2012 году на территории МГУ им. М.В. Ломоносова (N 55.709281°, E 37.523136°) были созданы почвенные конструкции (Сусленкова и др., 2018). Для этого был выкопан котлован глубиной 30 см. Изъятый из него материал гор. Апах представлял собой средний суглинок (содержание физической глины 35%). Он был тщательно перемешан, гомогенизирован и помещен на дно котлована в виде слоя мощностью 12 см. На его поверхность установили деревянные квадратные рамы размером 50x50 см и высотой 18 см. Рамы последовательно заполняли слоями почв. В качестве субстратов использовались (1) гор. Апах урбанозема, изъятый из котлована, (2) торф низинный, обогащенный, пакетированный «Селигер-Агро», (3) песок карьерный с преобладанием фракции мелкого песка. Первый вариант конструкций полностью состоял из гомогенизированного горизонта Апах (контроль). Второй вариант представлял последовательное чередование слоев мощностью 6 см: Апах-торф-песок. Третий вариант - смесь грунтов, взятых в том же соотношении, что и в слоистой конструкции. Гранулометрический состав смеси представлял собой супесь (содержание физической глины – 18%). Конструкции были тепло- и гидроизолированы. Всего было создано 28 площадок. Поверхность площадок была засеяна смесью газонных трав, состоящей из овсяницы красной (*Festuca rubra*) и райграса пастбищного (*Lolium perenne*) в соотношении 90%: 10%, плотность посева 0,05 г/см². С 2012 по 2016 гг. на площадках производились полив и стрижка газонных трав, удаление сорных растений. Согласно предыдущим исследованиям (Вайгель, 2014; Сусленкова и др., 2018). отметим, что за 4 года функционирования наибольшие изменения наблюдались в содержании общего углерода.

Реологические исследования были проведены на ротационном вискозиметре «Реотест-2» с системой коаксиальных цилиндров (Теория и методы, 2007). Были проанализированы исходные образцы 2012 г. и образцы 2016 г. из верхних (0-6 см) и нижних (18-24 см) слоев, как граничные в составе конструкций. Слой 0-6 см претерпевает самое большое влияние со стороны внешних факторов. Нижний слой 18-24 см является переходным к подстилающей почве и испытывает на себе влияние всего профиля конструкции. Средняя проба из слоев по 2см была растерта пестиком с резиновым наконечником и просеяна через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растертые образцы помещались в пластиковые трубки и насыщались капиллярно в течение суток на песке.

Для каждого образца на ротационном вискозиметре в 4х-кратной повторности было измерено напряжение сдвига с постепенным увеличением и последующим снижением скорости сдвига (всего 12 скоростей с 0,167 до 145,8 с⁻¹). Интервал измерения на каждой скорости составил 1 минуту. Были получены основная и дополнительная реологические кривые (зависимость напряжения сдвига (τ , кПа) от скорости сдвига (γ , с⁻¹) и зависимость эффективной вязкости (η , Па*с) от скорости сдвига (γ , с⁻¹) соответственно).

По основной реологической кривой прямого хода был произведен расчет реологических параметров: R_{k1} – «предел Шведова» - напряжение сдвига, при котором начинается заметная деформация системы, характеризует прочность структурных связей перед деформацией, R_{k2} – напряжение сдвига, соответствующее быстрому разрушению структуры и снижению эффективной вязкости (Теория и методы, 2007), $R_{кон}$ -напряжение сдвига в конце эксперимента, соответствующее прочности неразрушенных и образовавшихся после снижения нагрузки связей. Статистическое сравнение реологических параметров было проведено с использованием непараметрического метода Манна-Уитни (Mann-Whitney U-test).



Результаты и обсуждение

На рис.1 представлены в общем виде все наблюдаемые формы реологических кривых образцов 2012 и 2016 гг. для различных вариантов конструкций. В основном, формы кривых для повторностей одного и того же образца имели одинаковый характер, но в ряде случаев наблюдались различия.

Можно выделить несколько разновидностей реологических кривых. Первая наблюдается в исходном образце Апах горизонта. Петля, обратная гистерезисной, в области высоких скоростей сдвига, вероятно, свидетельствует о том, что структура агрегирована. При увлажнении и деформации происходит разрушение агрегатов, увеличивается плотность упаковки и площадь контактов между частицами. При последующем снятии нагрузки возрастает количество коагуляционных связей внутри образца (Абрукова, Манучаров 1985; Хайдапова и др., 2014). Однако, напряжение сдвига R_{k1} выше напряжения сдвига $R_{кон}$. Такое реологическое поведение в 2016 г. сохраняется лишь в верхнем слое конструкции 1 варианта.

Вторая разновидность реологических кривых наблюдается для нижних слоев 1 и 2 варианта конструкций. Практически на всем интервале скоростей кривая обратного хода выше кривой прямого хода. Структура агрегирована. Но напряжения сдвига в начале и конце эксперимента практически совпадают. Значения параметра R_{k1} снизились за время функционирования (рис.2). Значения параметра R_{k2} – напряжения сдвига, при котором происходит лавинообразное разрушение структуры, и диапазон его варьирования также снизились. Эти изменения статистически достоверны (при $p=0.05$) и свидетельствуют о снижении прочности структурных связей в нижних слоях 1 и 2 варианта конструкций.

Третий тип реологического поведения характерен для исходного образца смеси, который был использован для создания 3 варианта конструкций. В этом образце содержится большое количество крупнодисперсной фракции песка и торфа. Кривая прямого хода значительно выше кривой обратного хода. По мнению Н.Б. Урьева (1980) в таких системах роль сил сцепления по сравнению с силой инерции частиц и действием внешних сил, приводящих их в движение, незначительна. Действительно, вязкость уменьшается на всем диапазоне скоростей, система так и не достигает состояния текучести.

В образцах верхних горизонтов 2 и 3 вариантов конструкций и нижнего горизонта 3 варианта наблюдаются переходные формы реологических кривых.

Так в верхнем слое 2 варианта конструкций в двух повторностях кривых уменьшается площадь петли в области высоких скоростей сдвига, в остальных повторностях петля совсем исчезает, что может свидетельствовать об увеличении внутри образца содержания крупнодисперсных гранулометрических фракций. Этот слой в конструкции 2 типа подстилается торфяным слоем. При отборе образцов в 2016 г. было отмечено присутствие торфяных включений, что, вероятно, связано с деятельностью мезофауны. Это подтверждается и данными о содержании общего углерода. В конструкциях слоистого типа в верхнем слое 0-6 см оно значительно увеличилось с 2.24 ± 0.05 до 3.77 ± 0.6 %, (Сусленкова и др., 2018).

Аналогичное изменение формы кривых наблюдается и для нижнего слоя 3 варианта конструкций, в котором с 2012 по 2016 г. увеличилось содержание песчаной фракции (Сусленкова и др., 2018).

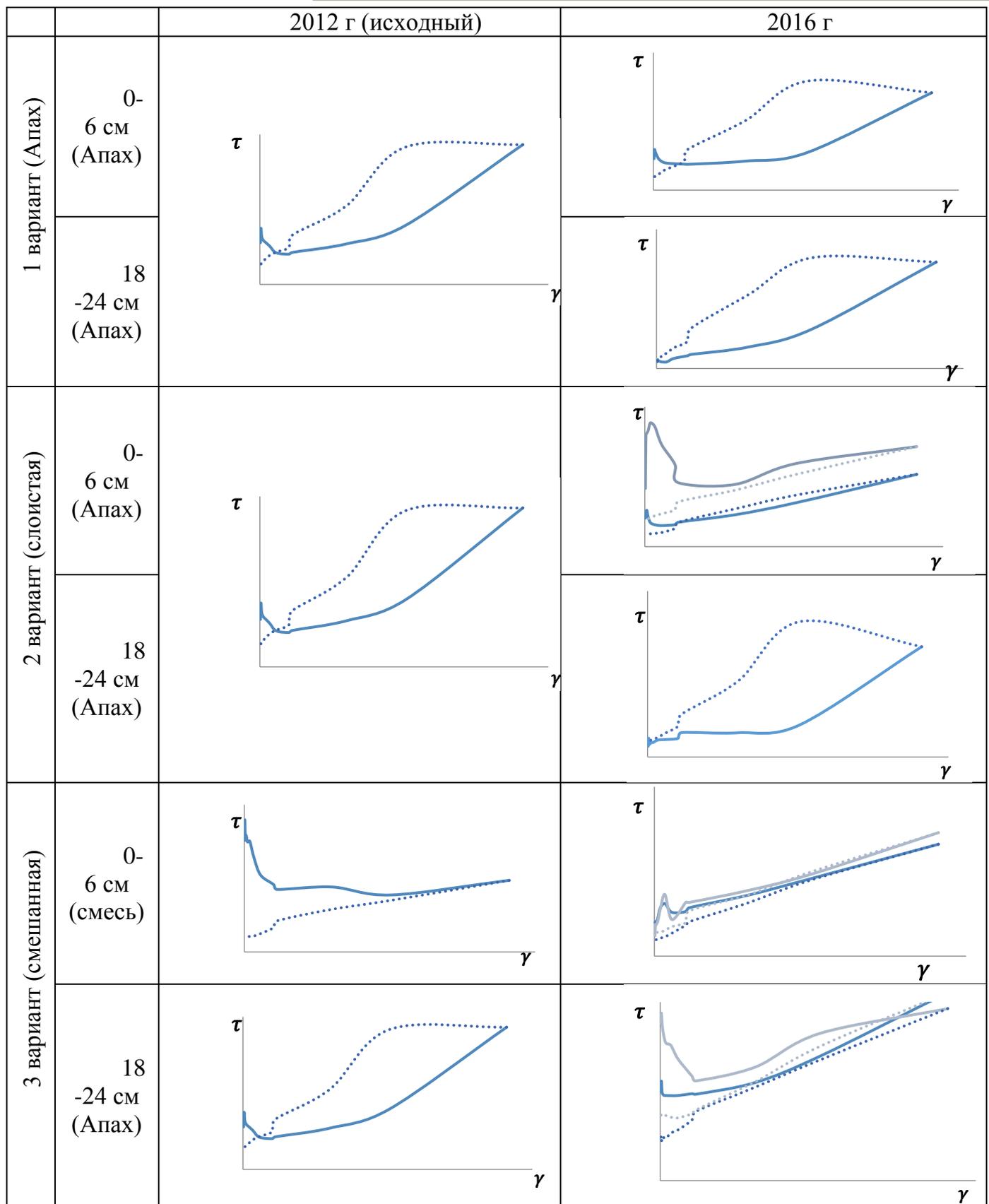


Рис. 1. Формы реологических кривых для различных вариантов конструкций (сплошной линией обозначен прямой ход, пунктирной линией – обратный ход реологической кривой).

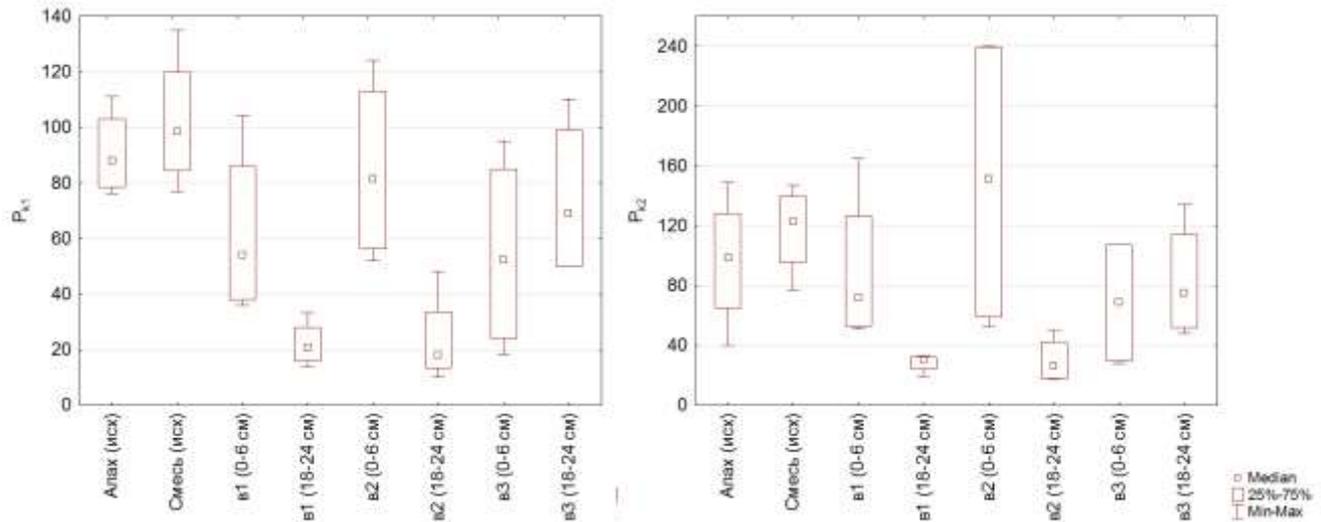


Рис. 2. Варьирование параметров P_{k1} и P_{k2} (Па) в образцах 2012 и 2016 гг.

В верхнем слое 3 варианта конструкции наблюдаются обратные изменения. Разность между начальным и конечным напряжением сдвига уменьшилась за время функционирования. Наблюдается появление петли в области высоких скоростей сдвига, что может быть связано с увеличением доли микроагрегатов и снижением доли торфяных частиц в составе смеси в результате постепенного разложения торфяной массы. Это также подтверждается данными о содержании общего углерода. В верхнем слое 0-6 см варианта 3 оно снизилось с 6.00 ± 0.05 до 3.48 ± 0.03 % (Сусленкова и др., 2018).

Выводы

За 4 года функционирования почвенных конструкций произошли изменения в реологическом поведении верхних и нижних слоев. Прочность структурных связей нижних горизонтов 1 и 2 варианта снизилась. Наблюдается изменение формы реологических кривых верхнего горизонта слоистой конструкции, обусловленное влиянием подстилающего слоя торфа, увеличившего в нем содержание крупнодисперсной фракции. Изменение форм реологических кривых произошло и в 3 варианте конструктоземов, что связано с процессами разложения торфа и перераспределения песчаной фракции в профиле. Таким образом реологическая кривая может являться индикатором микроструктурных изменений почвенных конструкций в процессе их развития.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

1. В.В. Аbruкова, А.С. Манучаров. Некоторые особенности деформации почв при реологических исследованиях. Почвоведение, 1985, №6, 89-95.
2. А.Э. Вайгель, А.Б. Умарова, М.М. Сусленкова, Т.Н. Початкова. Изменение свойств твердофазных компонентов почвенных конструкций в первые годы их функционирования. Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2014, №5 (115), 48-52.



3. 3. А.Б.Умарова, А.Э.Вайгель, А.А.Кокорева, М.М.Сусленкова, М.А.Бутылкина. Функционирование специализированных почвенных конструкций в условиях города Москвы. Вестник Оренбургского государственного университета, 2013, №10, 355-358.
4. 4. А.Б. Умарова Т.В.Иванова. Динамика дисперсности модельных дерново-подзолистых почв в многолетнем лизиметрическом эксперименте. Почвоведение, М: Наука, 2008, №5, 587-598.
5. 5. Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеевко. Неньютоновское поведение структурированных систем. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016, 384.
6. 6. М.М. Сусленкова, А.Б. Умарова, М.А. Бутылкина. Микроструктура почв разного генезиса и ее трансформация в составе конструкторземов в условиях г. Москвы. Почвоведение, 2018, №10, 1265-1237.
7. 7. Теория и методы физики почв. Под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. Тула: Гриф и К, 2007, 616.
8. 8. Н.Б. Урьев. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.:Химия, 1980, 320.
9. 9. Д.Д.Хайдапова, Ю.В. Холопов, И.В. Забоева, Е.М. Лаптева. Реологические особенности коагуляционной структуры северотаежных торфянисто-подзолисто-глееватых почв Европейского северо-востока. Вестник Московского Университета, сер. 17, Почвоведение, 2014, №1, 20-25.
10. 10. W. Markgraf, R. Horn, S. Peth. An approach to rheometry in soil mechanics – Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. Soil & Tillage Research, 2006 (91), 1-14.
11. 11. W. Markgraf, C.W. Watts, W.R. Whalley, R. Horn Influence of mineralogical compounds and organic matter on rheological properties: Classifying stiffness degradation in soils. Proceedings of the 21st ACMS Conference, Brisbane, Australia, 2010, 7-8.



УДК 631.41.

СВЯЗЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕНЕТРАЦИИ С ДИНАМИЧЕСКИМИ, ГЕНЕТИЧЕСКИМИ И ЛИТОГЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНОЙ И ПОЛУПУСТЫННОЙ ЗОН

Голованов Д.Л.^{1,2}, Сорокин А.С.³, Конюшкова М.В.^{2,3}, Красильников П.В.³, Агаджанова Н.В.³,
Головлева Ю.А.³, Сидорова В.А.⁴

¹Географический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

²Почвенный Институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация

dm_golovanov@mail.ru

³Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

leshasorokin@gmail.com

⁴Институт Биологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск

val.sidorova@gmail.com

NAME IN ENGLISH LANGUAGE

Golovanov D.L., Sorokin A.S., Konyushkova, Krasil'nikov P.V., Agadzhanova N.V., Golovlyova Yu.A.,
Sidorova V.A.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: Pedodiversity studies of the soil cover were carried out in the areas of broadleaf forests (Moscow Region) and semideserts (Caspian Lowland, Dagestan). The following methods and equipment were used: DGPS geodetic referencing and creating a DEM, Ejkalkamp penetrologger to measure the penetration resistance, and routine morphological descriptions of soils combined with data on chemical analysis and soil micromorphology. The morphological heterogeneity of the soil cover correlated well with the physical properties such as soil density, moisture content, resistance to penetration.

Введение

Использование сопротивления пенетрации позволяет получить объективную картину плотности сложения почвы на значительной площади с необходимой детальностью, с небольшими временными и физическими затратами и с минимальным нарушением анализируемого объекта – почв. Сопротивление пенетрации является функцией комплекса почвенных свойств и признаков, их профильного распределения: влажности, гранулометрического состава, оструктуренности, обусловленной гумусированностью, и в то же время служит самостоятельным экологическим фактором роста растений. Оно, на наш взгляд, должно быть включено в систему почвенно-биогеоценологических исследований, предложенную В.О. Карпачевским и А.Д. Ворониным с соавторами (Почвенно-биогеоценологические ... , 1980)

Объекты и методы

Исследования проводились на двух ключевых полигонах – в подзоне широколиственных лесов лесостепной зоны на северных склонах Среднерусской возвышенности (Озерский район Московской области) и на разновозрастных разновысотных приморских равнинах в полупустынной зоне (Республика Дагестан).

Отбор и описание и анализ проб, сопротивление пенетрации в Дагестане осуществлялись буром на трех ключевых разновысотных и разновозрастных участках площадью 300-400 м² по регулярной сетке с шагом 1,5-2 метра до глубины 1,5 метра послойно через 10 см. Почвы – от слабо измененных почвообразованием лагунно-морских отложений



(луговые солончаковые почвы и маршевые солончаки) до трехчленного солонцового комплекса на поверхности возраста более 2500 лет (Конюшкова и др., 2018).

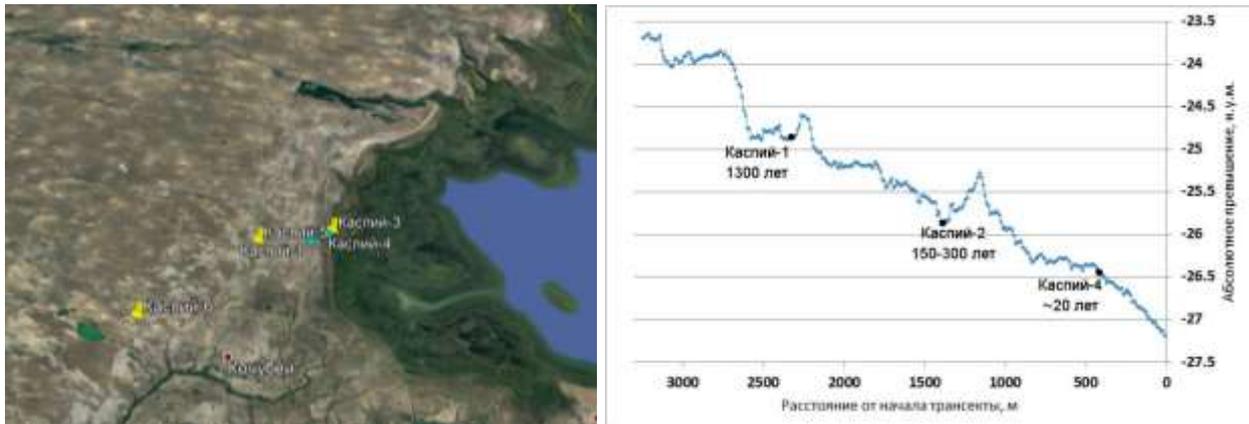


Рис. 1. Местоположение и высотные профили ключевых участков полигона «Кочубей»

В подзоне широколиственных лесов на неоднородной зональной структуре почвенного покрова, состоящей из серых лесных и серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом с участием дерново-подзолистых почв был изучен относительно однородный залесенный приводораздельный участок площадью 1 км². Разрезы закладывались по случайно-регулярной сетке с шагом около 100 м (рис. 2). Образцы на общие анализы (гумус, рН, гранулометрический состав), а также плотность сложения и влажность отбирались погоризонтно до текстурного горизонта включительно.



Рис. 2. Местоположение ключевого участка «Озеры»

Соппротивление пенетрации измерялось в трех повторностях до 80 см стрелочным пенетрометром (пенерологгером) Eijkelkamp с конусом диаметром 1 см.

Обработка материалов производилась в программах Excel, Statistica, Voxler, Saga и Quantum GIS.



Результаты и обсуждение

В подзоне широколиственных лесов (серые лесные почвы) сопротивление пенетрации четко отражает степень текстурной дифференциации почвенного профиля (рис. 3).

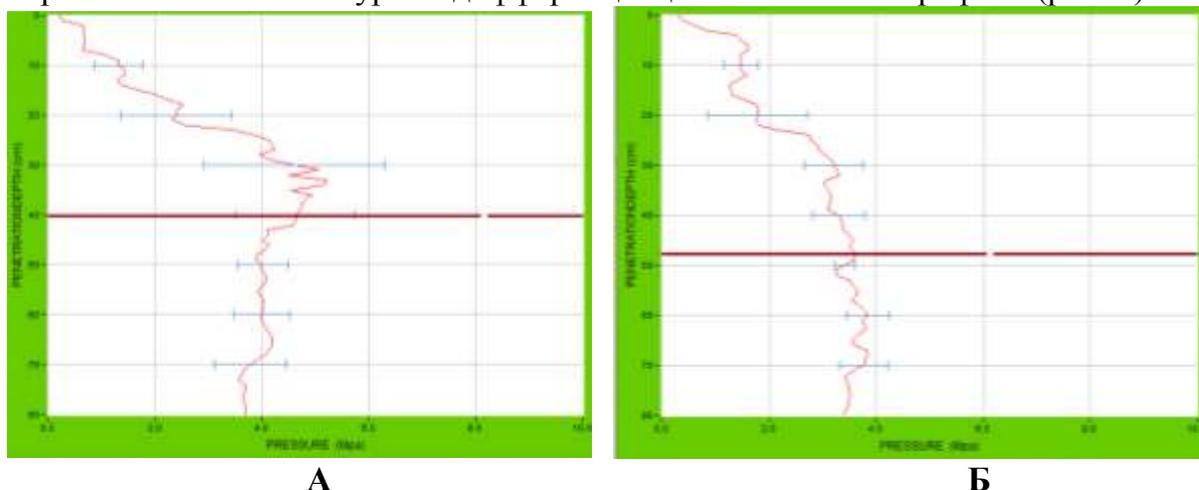


Рис. 3. Профильное распределение сопротивления пенетрации для дерново-подзолистых (А) и серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом (Б) на ключевом участке «Озеры».

Контуры ареалов равной плотности сложения и гумусированности тесно связаны с палеокриогенным микрорельефом, реликтовыми и динамическими свойствами, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими исследователями (Алифанов, 2010, Архангельская, 2012, Макеев, 2012, Умарова, 2011 и др.).

Дальнейшая дифференциация почвенного профиля, проявляющаяся в том числе и в плотности сложения, может привести к необратимой эволюции почвенно-растительного покрова: смене широколиственных лесов на относительно слабо дифференцированных серых лесных почвах хвойно-широколиственными и хвойными (еловыми) лесами на дерново-подзолистых почвах из-за активизации элювиально-глеевого процесса и затруднения проникновения стержневой корневой системы широколиственных пород в толщу породы, преимущественному развитию поверхностной корневой системы елей.

Антропогенные изменения плотности сложения требуют дальнейших исследований из-за переуплотнения пахотных горизонтов на порядок по сравнению с гумусовыми горизонтами лесных почв.

На ключевом полигоне «Кочубей» пространственное распределение сопротивления пенетрации позволяет оценить первичную литологическую дифференциацию почвенного покрова молодых приморских равнин Прикаспия и других, близких по генезису территорий (Рис. 4, 5).

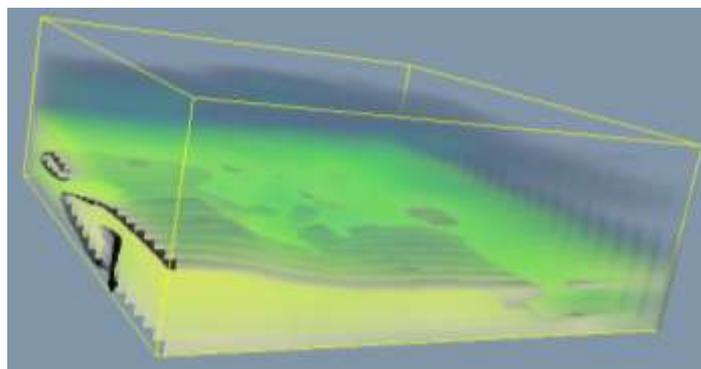


Рис. 4. Объемное распределение сопротивления пенетрации до глубины 80 см на ключевом участке Каспий-3. Построено с использованием программы Voxler



Развитие почвообразовательных процессов в полупустынной зоне приводит к разнонаправленным изменениям плотности сложения: Аккумуляция легкорастворимых солей и гипса приводит к разрыхлению почвенной массы, особенно тяжелосуглинистых и глинистых прослоев, снижению сопротивления пенетрации и объемного веса почв, росту микробугров на участках скопления солей и гипса (рис. 5 В, глубина 15-40 см).

Рассоление, сопровождающееся осолонцеванием, наоборот, формирует приповерхностные уплотненные горизонты (рис. 5 В, глубина 3-7 см).

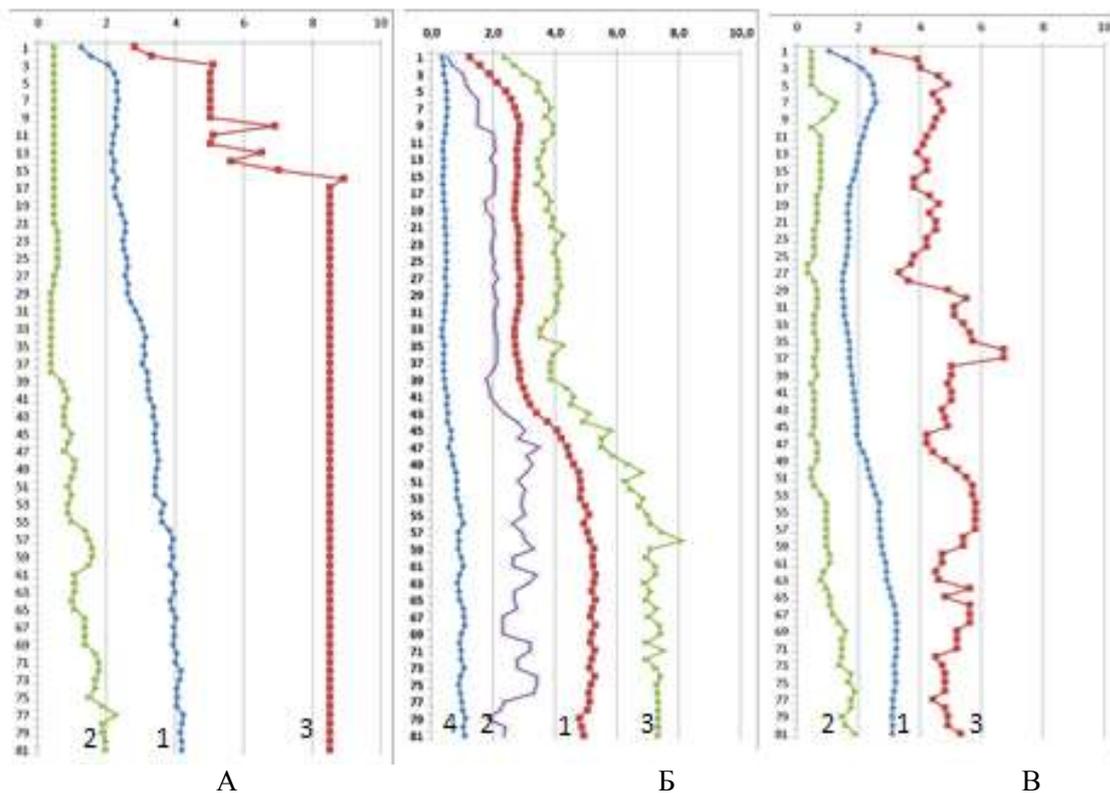


Рис. 5. Профильное распределение сопротивления пенетрации на участках (А-Каспий-4, Б- Каспий-3, В – Каспий-5)

1 – среднее значение по участку; 2 – минимальное; 3 – максимальное; 4 – стандартное отклонение.

Гумусонакопление вновь снижает показатели сопротивления пенетрации.

Абсолютные значения величины сопротивления различаются в различные сезоны, что обусловлено сезонными различиями влажности почв. В то же время, сохраняются основные закономерности профильного распределения этого показателя.

Выводы

1. В подзоне широколиственных лесов (серые лесные почвы) сопротивление пенетрации четко отражает степень текстурной дифференциации почвенного профиля.
2. Контуры ареалов равной плотности сложения и гумусированности тесно связаны с палеокриогенным микрорельефом, реликтивными и динамическими свойствами, что хорошо согласуется с результатами, полученными другими исследователями.



3. Дальнейшая дифференциация почвенного профиля, проявляющаяся, в том числе, и в плотности сложения, может привести к необратимой эволюции почвенно-растительного покрова.
4. Антропогенные изменения плотности сложения требуют дальнейших исследований из-за переуплотнения пахотных горизонтов на порядок по сравнению с гумусовыми горизонтами лесных почв.
5. Пространственное распределение сопротивления пенетрации позволяет оценить первичную литологическую дифференциацию почвенного покрова молодых приморских равнин Прикаспия и других, близких по генезису территорий.
6. Развитие почвообразовательных процессов в полупустынной зоне приводит к разнонаправленным изменениям плотности сложения:
 - a. Аккумуляция легкорастворимых солей и гипса приводит к разрыхлению почвенной массы, особенно тяжелосуглинистых и глинистых прослоев, снижению сопротивления пенетрации и объемного веса почв, росту микробугров на участках скопления солей и гипса.
 - b. Рассоление, сопровождающееся осолонцеванием, наоборот, формирует приповерхностные уплотненные горизонты.
 - c. Гумусонакопление вновь снижает показатели сопротивления пенетрации.
 - d. Абсолютные значения величины сопротивления пенетрации обусловлены сезонными различиями влажности почв.
7. Сопротивление пенетрации должно быть включено в систему почвенно-биогеоценологических исследований, предложенную В.О. Карпачевским и А.Д. Ворониным с соавторами.

Благодарности: Работа осуществлена при поддержке РФФ (проект № 17-17-01293).

Литература

- Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Овчинников А.Ю. Палеокриогенез и разнообразие почв центра Восточно-Европейской равнины М.: «Геос», 2010. 160 с.
- Архангельская Т. А. Температурный режим комплексного почвенного покрова. — ГЕОС Москва, 2012. — 282 с.
- Макеев А. О. Поверхностные палеопочвы лёссовых водоразделов Русской равнины. - ЗАО "Молнет" Москва, 2012. 300 с.
- Первичная дифференциация почвенного покрова на молодой приморской равнине Прикаспия (на примере России и Ирана) / М. В. Конюшкова, С. Алавипанах, А. Абдоллахи и др. // Степи Северной Евразии: материалы VIII международного симпозиума (под ред. А.А. Чибилева). — ИС УрО РАН Оренбург, 2018. — С. 488–491.
- Почвенно-биогеоценологические исследования в лесных БГЦ / Л. О. Карпачевский, А. Д. Воронин, Е. А. Дмитриев и др. — Изд-во Московского университета Москва, 1980. — 160 с.
- Пространственная дифференциация засоления на молодой приморской солончаковой равнине Прикаспия / М. В. Конюшкова, С. Алавипанах, А. Абдоллахи и др. // *Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева*. — 2018. — Т. 95. — С. 41–57
- Умарова А. Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. — ГЕОС Москва, 2011. — 269 с.
- <https://ru.eijkelkamp.com/products-ru/Field-measurement-equipment-ru/handpenetrometer-eijkelkamp.html>



УДК 633.18: 631.4

УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ПОЧВ РИСОВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ

Гуторова О.А.^{1,2}, Зубкова Т.А.³, Шеуджен А.Х.^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт риса, Краснодар,
Российская Федерация, ashad.sheudzhen@mail.ru

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская
Федерация

³Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

SPECIFIC SURFACE OF RICE AGROLANDSHAFT SOILS

Gutorova O.A., Zubkova T.A., Sheudzhen A.Kh.

¹All Russian Rice Research Institute, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

³Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ashad.sheudzhen@mail.ru

Annotation: The change of the mineral matrix of the soil of rice agrolandscapes is considered. The mineral matrix is transformed depending on the type of soil, the particle size distribution and the duration of rice cultivation. Arable horizons of meadow chernozem and meadow bog soils used in rice crop rotation do not transform according to the size of the mineral matrix - their specific surface area (S), dry land deposits and deposits are in the range of 35-55 m²/g. The transformation of the mineral matrix occurs in the subsoil horizons of the meadow-marsh soil (S=73-160 m²/g), which is associated with the weighting of the particle size distribution. The maximum changes in the mineral matrix of meadow chernozem soil occur during the permanent cultivation of rice (80 years). There is a decrease in the specific surface area from 35-55 to 24 m²/g.

Введение

Минеральная матрица почв характеризует устойчивые почвенные компоненты – силикаты, алюмосиликаты, оксиды, гидроксиды и др. Минеральная матрица – это поверхность минеральных частиц. Смена окислительных условий на восстановительные, обусловленная спецификой возделывания культуры риса, является основной причиной разрушения почвенных минералов. Насколько процессы окисления и восстановления затронули минеральную часть почв, вовлеченных в рисосеяние, показывают изменения в спектре активных центров минеральной матрицы по их силе (Зубкова, Карпачевский, 2001; Зубкова, Гуторова, Шеуджен, 2017).

С деструкцией первичных и вторичных минералов связывают повышение дисперсности почв при оглеении. Важной характеристикой твердой фазы почвы является удельная поверхность – суммарная поверхность всех ее частиц. Этот показатель играет важную роль в формировании почвенного плодородия, поскольку многие процессы, протекающие в почвах во многом обусловлены величиной и свойствами поверхности их твердой фазы, ее геометрической и энергетической неоднородностью. Этот показатель используется для сравнительной оценки дисперсности разных почв и их динамики в ходе почвообразовательных или деградационных процессов (Smagin, Bashina et al., 2017; Utkueva, 2007).

Цель работы – изучить изменение удельной поверхности почв рисовых агроландшафтов Кубани в условиях агрогенеза.



Объекты и методы

Исследования проведены на рисовой оросительной системе и неорошаемом участке ФГУ ЭСП "Красное" Красноармейского района Краснодарского края. В пределах землепользования предприятия были заложены почвенные разрезы:

Разрез № 1. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}12'32.35''$, N $38^{\circ}23'22.93''$, E). Почва – лугово-черноземная слабогумусная слабовыщелоченная мощная среднесуглинистая на аллювиальных тяжелых суглинках.

Разрез № 3. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}14'0.67''$, N $38^{\circ}19'20.12''$, E). Почва – лугово-черноземная слабогумусная слабовыщелоченная мощная тяжелосуглинистая на аллювиальных глинах.

Разрез № 4. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}13'9.46''$, N $38^{\circ}19'16.28''$, E). Почва – лугово-черноземная слабогумусная слабовыщелоченная среднемошная среднесуглинистая на аллювиальных тяжелых суглинках.

Разрез № 5. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}12'31.87''$, N; $38^{\circ}22'7.12''$, E). Почва – лугово-болотная слабогумусная слабовыщелоченная мощная среднесуглинистая на аллювиальных оглеенных глинах.

Разрез № 9. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}13'24.22''$, N; $38^{\circ}24'10.73''$, E). Почва – лугово-болотная слабогумусная слабовыщелоченная среднемошная легкоглинистая на погребенной почве.

Разрез № 11. Вид угодий: богарная пашня ($45^{\circ}12'53.79''$, N; $38^{\circ}18'59.04''$, E). Почва – лугово-черноземная малогумусная карбонатная среднемошная тяжелосуглинистая на аллювиальных тяжелых суглинках.

Разрез № 12. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}13'54.98''$, N; $38^{\circ}19'10.92''$, E). Почва – лугово-черноземная малогумусная слабовыщелоченная мощная легкоглинистая на аллювиальных легких глинах.

Разрез № 14. Вид угодий: рисовый чек ($45^{\circ}13'18.97''$, N; $38^{\circ}22'26.66''$, E). Почва – лугово-болотная малогумусная слабовыщелоченная среднемошная легкоглинистая на аллювиальных оглеенных глинах.

Разрез № 15. Вид угодий: залежь, расположенная на рисовой оросительной системе и в рисовый севооборот не вовлекалась ($45^{\circ}14'0.63''$, N; $38^{\circ}19'36.28''$, E). Почва – лугово-черноземная малогумусная слабовыщелоченная среднемошная тяжелосуглинистая на аллювиальных тяжелых суглинках.

Проанализированы образцы пахотного ($A_{\text{пах}}$) и подпахотного (A), а также дернового (A_d) и гумусового (A) горизонтов, отобранных в условиях рисосеяния, богары и залежи.

Спектр кислотных центров почвенной минеральной матрицы (ПММ) определяли методом термопрограммированной десорбции аммиака (ТПД- NH_3) с масс-спектрометрическим анализом на приборе УСГА-101 (ООО «УНИСИТ»).

Удельную поверхность почв определяли методом низкотемпературной адсорбции азота органо-минеральной (исходных – $S_{\text{исх}}$) и минеральной матрицы ($S_{\text{ПММ}}$) (Милановский и др., 2011).

Результаты и обсуждение

Анализ термодесорбционных спектров аммиака ПММ лугово-черноземной и лугово-болотной почв показал их однотипность, для которых характерен один низкотемпературный пик с точками перегиба в интервале $170\text{--}230^{\circ}\text{C}$. Разница наблюдается в абсолютных значениях скорости десорбции молекул аммиака. В глинистых разновидностях лугово-болотной и лугово-черноземной почв достигается максимальная скорость десорбции NH_3 . В лугово-



черноземной средне- и тяжелосуглинистой почве она почти в 2 раза ниже. В почве бессменного посева риса обнаружены самые низкие значения кислотных центров (рис. 1).

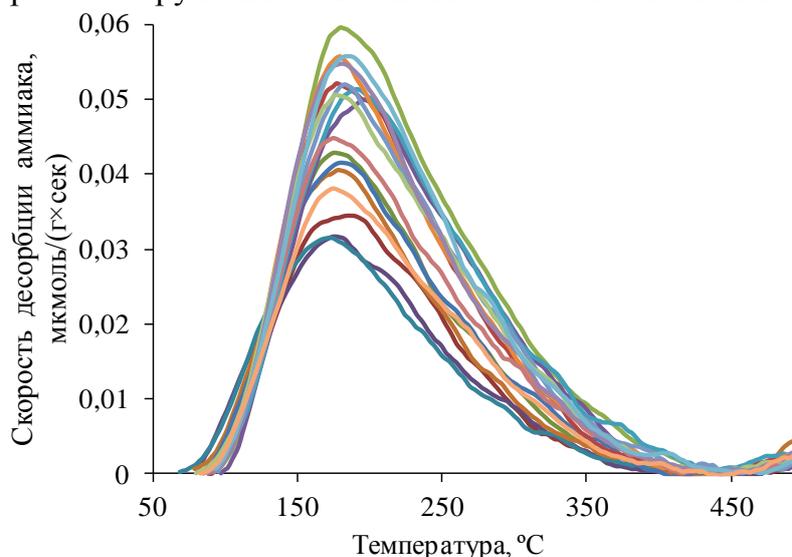


Рис. 1. Скорость термодесорбции аммиака минеральной матрицы лугово-черноземной и лугово-болотной почв

С утяжелением гранулометрического состава почвы увеличивается общая удельная поверхность органо-минеральной и минеральной матрицы. Почвы среднесуглинистые характеризуются меньшей площадью удельной поверхности по сравнению с тяжелосуглинистыми и глинистыми разновидностями.

Результаты исследований показали, что удельная поверхность пахотных горизонтов почв рисовых полей варьирует в диапазоне 26,2-51,7 м²/г в органо-минеральной и 24,2-50,2 м²/г в минеральной матрице. В подпахотных горизонтах значения и разброс данных увеличиваются до 26,9-88,0 и 24,1-164,0 м²/г соответственно. Такая дифференциация почвенного профиля сильнее выражена в глинистых разновидностях лугово-болотной почвы. Причем в органо-минеральной и минеральной матрице она достигает 50,0-88,0 и 75,3-164,0 м²/г соответственно, что выше в 2,0-3,0 раза, чем в подпахотных горизонтах лугово-черноземной почвы.

Самая низкая величина удельной поверхности почвы обнаружена при бессменном возделывании риса в течение 80 лет, которая меньше в 1,5-2,0 раза, чем в условиях рисового севооборота

Удельная поверхность лугово-черноземной почвы богары и залежи характеризуется слабой дифференциацией минеральной матрицы и по значениям близка к почвам, используемых в рисовом севообороте.

Удельная поверхность естественной почвы во многом определяется размерами минеральной матрицы, которая унаследована от почвообразующей породы. В процессе почвообразования и сельскохозяйственного использования почв происходит формирование матричного гумуса, закрепленного на минеральной матрице. Поэтому в естественных почвах наблюдается пропорциональная линейная зависимость удельной поверхности органо-минеральной от минеральной матрицы почв ($S_{исх}$ от $S_{пмм}$). В почвах рисовых агроландшафтов установлена такая же зависимость. Полученные данные по зависимости $S_{исх}$ от $S_{пмм}$ сгруппированы в три контура (рис. 2).

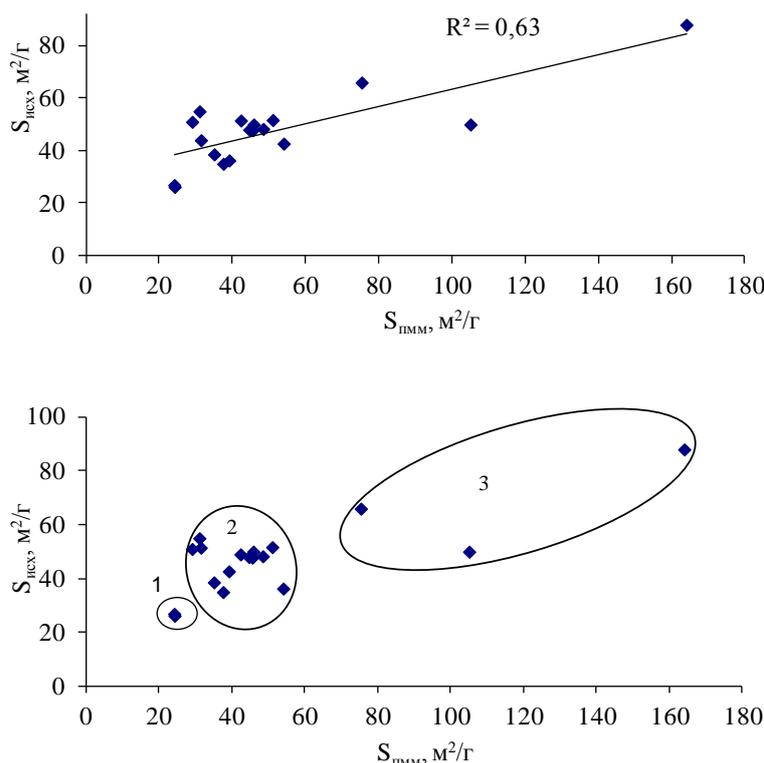


Рис. 2. Зависимость удельной поверхности почвы органо-минеральной ($S_{исх}$) от минеральной матрицы ($S_{пмм}$)

В первый контур вошла лугово-черноземная почва бессменного возделывания риса ($S = 24 \text{ м}^2/\text{г}$), во второй – лугово-черноземная и лугово-болотная почвы, вовлеченные в рисовый севооборот, а также лугово-черноземная почва богары и залежи ($S = 35\text{-}55 \text{ м}^2/\text{г}$), в третий – нижние горизонты лугово-болотной почвы рисовых полей ($S = 73\text{-}160 \text{ м}^2/\text{г}$).

Отсюда следует, что пахотные горизонты лугово-черноземной и лугово-болотной почв, вовлеченных в рисосеяние, по размеру минеральной матрицы не трансформируются. Это обусловлено ежегодной механической обработкой пахотного слоя, снижающей негативное воздействие периодической смены процессов иссушения и увлажнения. Изменения минеральной матрицы выявлены в подпахотных горизонтах лугово-болотной почвы, что связано с утяжелением гранулометрического состава. Бессменное возделывание риса привело к уменьшению площади удельной поверхности и кислотных центров по сравнению с полями рисового севооборота, несмотря на тяжелосуглинистый гранулометрический состав почвы. Последнее указывает на изменения структурной организации минеральных частиц почв с длительностью возделывания риса.

Выводы

1. В лугово-болотной почве рисовых полей происходит дифференциация профиля по удельной поверхности, как органо-минеральной, так и минеральной матрицы, увеличивающаяся в подпахотных горизонтах на 40-145 % и более по сравнению с пахотными. В лугово-черноземной почве этот показатель возрастает лишь на 25-28 %. Участки почвы залежи и богары отличаются слабой дифференциацией профиля по минеральной матрице.



2. Минеральная матрица трансформируется в зависимости от типа почв, гранулометрического состава и длительности возделывания риса. Пахотные горизонты лугово-черноземной и лугово-болотной почв, используемых в рисовом севообороте, по размеру минеральной матрицы не трансформируются – площади удельной их поверхности (S), богары и залежи находятся в близком диапазоне 35-55 м²/г. Трансформация минеральной матрицы происходит в подпахотных горизонтах лугово-болотной почвы (S = 73-160 м²/г), что связано с утяжелением гранулометрического состава. Максимальные изменения минеральной матрицы лугово-черноземной почвы происходят при бессменном выращивании риса в течении 80 лет. Отмечается уменьшение площади удельной поверхности с 35-55 до 24 м²/г.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и министерства образования, науки и молодёжной политики Краснодарского края в рамках проекта № 16-44-230473.

Литература

- Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. (2001). Матричная организация почв. М.: РУСАКИ, 296.
- Зубкова Т.А., Гуторова О.А., Шеуджен А.Х. (2017) Матричная организация почв рисовых агроландшафтов Кубани. *Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ*, **133**, 904-922.
- Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н., Черноморченко Н.И., Манучаров А.С. (2011) Практикум по физике твердой фазы почв. Тула: «Гриф и К», 63.
- Smagin A.V., Bashina A.S., Klyueva V.V., Kubareva A.V. (2017) Thermal desorption analysis of effective specific soil surface area. *Eurasian soil science*, **12 (50)**, 1428-1434.
- Utkaeva V.F. (2007) Specific surface area and wetting heat of different soil types in European Russia. *Eurasian soil science*, **11 (40)**, 1193-1202.



УДК 631.434.2

ВОДОПРОЧНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ К ЭРОЗИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ В СКЛОНОВОМ РЕЛЬЕФЕ

Дармаева Н.Н., Билтуев А.С.

ФГБНУ Бурятский НИИСХ, Улан-Удэ, Российская Федерация

darmaeva.nina@gmail.com

**WATER STABILITY OF SOIL AGGREGATES AND EVALUATION OF CRYOSOLIC SOIL STABILITY
AGAINST EROSION DEPENDING ON THE POSITION IN SLOPE PROFILES**

Darmaeva N.N., Biltuev A.S.

Buryat research Institute of agriculture, Ulan-Ude, Russia

Annotation: The research considers the structural-aggregate composition of cryosolic soils formed in slope profiles of the Eravna hollow (Vitim plateau). Dry sieving determines high content of agriculturally valuable aggregates and high structural coefficients in soils irrespective of their position. Wet sieving causes the decomposition of aggregates into fragments of different sizes. The sum of aggregate content >0,25 mm (%) allows to evaluate the water stability of aggregates which determine the soil stability against erosion of soils at different slope levels.

Key words: cryosolic soils, slope profile, structural-aggregate composition, dry sieving, wet sieving, water stability of soil aggregates.

Введение

В связи с усилением хозяйственной деятельности в криолитозоне северных территорий Забайкалья, усиливается антропогенный пресс на природные экосистемы. Изучение закономерностей мерзлотного почвообразования, многолетней и сезонной динамики агрофизических и агрохимических свойств пахотных и целинных почв показало, что самым уязвимым компонентом экосистемы является почвенный покров. Было установлено, что в мерзлотных почвах пахотных угодий увеличивается мощность сезонно-талого слоя, в надмерзлотной части почв ухудшается гидротермический режим и нарушается баланс тепла и влаги. В ряде случаев изменяется характер почвообразования (Бадмаев, Куликов, Корсунов, 2006; Десяткин, 2009). В условиях расчлененного рельефа почвы отчетливо дифференцируются в зависимости от положения на склоне по тепловлагоресурсному потенциалу, по динамике агрофизических и агрохимических свойств, наблюдается перемещение почвенной массы, передвижение влаги с поверхностным и внутрипочвенным стоком и аккумуляция влаги и солей в почве в подножии склона (Куликов, Дугаров, Корсунов, 1997). Продуктивность естественных травостоев низкая (Пигарева, Швецова 2013). При формировании почв в склоновом рельефе большое значение имеет агрегатный состав и водопрочность агрегатов, предохраняющие от развития эрозии.

Эти вопросы не были отражены в ранее выполненных работах, поэтому целью данного исследования являлось изучение структурно-агрегатного состава и водопрочности агрегатов мерзлотных почв, сформированных в склоновом рельефе.

Объекты и методы

Исследования проводились в пределах полигон-трансекта в Еравнинской лесостепной котловине Витимского плоскогорья (Республика Бурятия) на южном склоне увала крутизной до 8°. На вершине склона (элювиальная позиция – э.п.) и середине склона (транзитная позиция



– т.п.) сформированы лугово-черноземные почвы под твердовато-осоковыми и полевицевым растительным сообществом; в подножии склона – аллювиальные луговые почвы (аккумулятивная позиция – а.п.) под леймуново-полевицевым и кострцово-осоковым сообществом.

Гранулометрический состав определяли пипет-методом с обработкой пирофосфатом натрия, агрегатный состав и водопрочность агрегатов – по Савинову. Результаты статистически обработаны по Доспехову.

Результаты и обсуждение

Раздел может содержать таблицы и рисунки. Выравнивание рисунков и таблиц, подрисуночных подписей и заголовков таблиц по центру. Размер шрифта в названиях и ячейках таблиц и в подрисуночных подписях – 12 пт. Использование вертикальных линий в таблицах не допускается.

Мерзлотные почвы южного склона увала Еравнинской котловины характеризуются суглинистым гранулометрическим составом. Частицы физической глины активно перемещаются по склону и аккумулируются в подножии в аллювиальной луговой почве. Содержание гумуса в органогенном горизонте лугово-черноземной почве на вершине склона и в аллювиальной луговой почве высокое, в почве транзитной зоны – низкое. Распределение гумуса резко убывающее вниз по профилю (Дармаева, Бадмаев, 2014).

Агрономически ценными агрегатами являются механически прочные, водоустойчивые агрегаты, представленные зернистыми и мелкозернистыми отдельностями размером от 1 до 0,25 мм. Но наиболее ценными агрегатами являются агрегаты размером от 5 до 0,25 мм. Агрегаты крупнее 5 мм водонеустойчивы и под воздействием воды распадаются на фрагменты разных размерностей. В образовании устойчивых агрегатов важную роль играют гуминовые кислоты, обогащенные кальцием. Кроме этого имеет значение коллоидальность илистой фракции. Водопрочные агрегаты формируются при содержании коллоидов в илистых частицах до 80 % . Цементирующими частицами являются Са, Al, Fe (Шеин, Милановский, 2003).

Как показано в таблице 1 при сухом просеивании мерзлотной лугово-черноземной почвы на вершине склона (э.п.) во всех почвенных горизонтах присутствуют все типы структурных агрегатов. Преобладающими являются агрегаты размерностью 2-3 мм, меньше всего содержатся агрегаты <0,25 мм. В горизонте В₂ в результате иллювиирования увеличивается количество пылеватых частиц <0,25 мм, а также агрегатов размером 0,25-0,5 мм, при более низком содержании других агрегатов по сравнению с верхним горизонтом.

При мокром просеивании в гумусовом горизонте почвы почти полностью разрушаются агрегаты размером от 1-2 до 5-7 мм. В подгумусовых горизонтах В₁ и В₂ в бóльшем количестве присутствуют частицы пылевой фракции <0,25 мм. Количество агрегатов диаметром 0,25-0,5 и 0,5-1 мм в 2 раза превышает результаты сухого просеивания. А.Д. Ворониным [18] было установлено, что прочность почвенных агрегатов снижается с увеличением их размерности, обусловленная повышением пористости и уменьшением контактов частиц в агрегате. Под действием воды агрегаты с крупными пустотами легко разрушаются в результате расклинивающего действия воды.

В лугово-черноземной почве на середине склона (т.п.) при сухом просеивании присутствуют агрегаты всех размерностей. По сравнению с почвой верхней позиции в гумусовом горизонте почвы (т.п.) увеличивается содержание фракции <0,25 мм и 0,25-0,5 мм при снижении агрегатов 0,5-1 мм. В подгумусовых горизонтах преобладают частицы <0,25 мм.



Таблица 1. Агрегатный состав мерзлотных почв (сухое просеивание / мокрое просеивание)

| Почва | Горизонт, глубина, см | Содержание фракций, % | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | | >10 | 10-7 | 7-5 | 5-3 | 3-2 | 2-1 | 1-0,5 | 0,5- 0,25 | <0,25 |
| Лугово-черноземная почва (э.п.) | A 0-24 | <u>10,8</u> | <u>6,4</u> | <u>5,9</u> | <u>13,2</u> | <u>16,3</u> | <u>30,3</u> | <u>7,7</u> | <u>6,1</u> | <u>3,3</u> |
| | | – | – | 4,6 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 13,7 | 7,7 | 72,5 |
| | B ₁ 24-36 | <u>10,5</u> | <u>6,3</u> | <u>5,8</u> | <u>12,9</u> | <u>15,9</u> | <u>29,6</u> | <u>7,5</u> | <u>5,9</u> | <u>3,3</u> |
| | | – | – | 0 | – | – | 0,5 | 10,6 | 13,3 | 75,6 |
| | B ₂ 36-68 | <u>11,6</u> | <u>8,9</u> | <u>6,5</u> | <u>8,9</u> | <u>9,5</u> | <u>15,3</u> | <u>6,5</u> | <u>13,2</u> | <u>19,8</u> |
| | | – | – | 0 | – | – | 0,4 | 7,4 | 14,1 | 78,2 |
| Лугово-черноземная почва (т.п.) | A _d 0-3 | <u>15,0</u> | <u>8,5</u> | <u>10,9</u> | <u>18,2</u> | <u>13,2</u> | <u>20,6</u> | <u>6,8</u> | <u>4,8</u> | <u>2,0</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,4 | 2,1 | 89,5 |
| | A 3-21 | <u>23,1</u> | <u>7,3</u> | <u>6,4</u> | <u>9,6</u> | <u>8,0</u> | <u>14,1</u> | <u>8,8</u> | <u>12,8</u> | <u>10,0</u> |
| | | – | – | 2,4 | 0,4 | 0,9 | 4,8 | 6,1 | 10,1 | 78,3 |
| | B 21-65 | <u>4,3</u> | <u>4,3</u> | <u>3,4</u> | <u>3,5</u> | <u>11,1</u> | <u>18,2</u> | <u>9,3</u> | <u>17,8</u> | <u>22,7</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0 | 4,7 | 0,4 | 9,7 | 88,9 |
| Лугово-черноземная почва (а.п.) | A 3-10 | <u>19,9</u> | <u>8,2</u> | <u>6,9</u> | <u>12,5</u> | <u>12,5</u> | <u>24,9</u> | <u>7,1</u> | <u>6,0</u> | <u>1,9</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0 | 0,3 | 22,4 | 12,9 | 64,4 |
| | Bca10-20 | <u>11,0</u> | <u>6,0</u> | <u>4,4</u> | <u>7,8</u> | <u>13,0</u> | <u>32,0</u> | <u>9,1</u> | <u>11,0</u> | <u>5,8</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0,2 | 4,5 | 7,8 | 16,7 | 70,7 |
| | BCa 20-55 | <u>18,3</u> | <u>7,4</u> | <u>7,4</u> | <u>13,0</u> | <u>12,9</u> | <u>23,3</u> | <u>6,7</u> | <u>7,5</u> | <u>3,6</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0 | 6,5 | 8,6 | 10,7 | 74,3 |
| Серая лесная (т.п.) | A 3-24 | <u>17,3</u> | <u>6,5</u> | <u>5,1</u> | <u>10,1</u> | <u>10,6</u> | <u>24,3</u> | <u>6,1</u> | <u>11,3</u> | <u>8,7</u> |
| | | – | – | 2,8 | 0,88 | 0,28 | 1,34 | 11,2 | 14,5 | 49 |
| | B ₁ 24-37 | <u>0</u> | <u>0,2</u> | <u>0,1</u> | <u>14,0</u> | <u>13,6</u> | <u>28</u> | <u>11,3</u> | <u>18,4</u> | <u>14,4</u> |
| | | – | – | 0 | 0 | 0 | 1,5 | 9,06 | 11,6 | 14,8 |

Примечание: э.п.; т.п.; а.п. – элювиальная, транзитная, аккумулятивная позиция на склоне.

В отличие от почвы верхней позиции в почве (т.п.) соотношение сухих агрегатов изменяется вследствие существенного превышения агрегатов <0,25 мм.

После мокрого просеивания в гумусовом горизонте доминирует фракций <0,25 мм. Их содержание в 7,5 раза превышает данные сухого просеивания и составляют 75 % от общей суммы агрегатов. Активно разрушаются агрегаты размером >1 мм. Их количество уменьшается в 10 раз по сравнению с сухим просеиванием. В подгумусовых горизонтах активно разрушаются агрегаты всех размерностей, а их фрагменты увеличивают количество агрегатов <0,25 мм. В почве в подножии склона (а.п.) в аллювиальной луговой почве при сухом просеивании определяются агрегаты всех размерностей (табл. 1). По всему почвенному профилю преобладают агрегаты размерностью 1-2 мм при низком содержании фракции <0,25 мм. При мокром просеивании полностью разрушаются агрегаты размером более 2-1 мм, но увеличивается содержание водопрочных агрегатов диаметром 1-0,5 и 0,5-0,25 мм, при этом существенно возрастает количество фракции <0,25 мм за счет разрушения более крупных агрегатов.

Таким образом, результаты сухого просеивания мерзлотных почв показали, что независимо от местоположения на склоне почвы характеризуются высоким содержанием агрономически ценных агрегатов, коэффициент структурности <1,5 означает хорошую оструктуренность почв (табл. 2).

В криолитозоне попеременные процессы промерзания, оттаивания в суточном и многолетнем циклах вызывают дезагрегацию структурных отдельностей со слабыми межчастичными связями внутри агрегатов, значительная пористость и качество «цементирующей» материала не обеспечивают формирование водопрочных агрегатов (Шейн, Милановский, 2003). Гуминовые кислоты мерзлотных почв отличаются слабой



степенью зрелости и низкой устойчивостью, обусловленные значительным содержанием в их составе алифатических групп (Меркушева, Убугунов, Чимитдоржиева, 2008).

Таблица 2. Содержание агрономически ценных агрегатов, коэффициент структурности и водопрочность агрегатов мерзлотных почв

| Почва | Горизонт, глубина, см | Содержание агрегатов: 0,25-10 мм, % | Коэффициент структурности | Содержание агрегатов > 0,25 мм при мокром просеивании, % |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| Лугово-черноземная почва (э.п.) | A 0-24 | 86 | 6,1 | 27 |
| | B ₁ 24-36 | 84 | 5,2 | 24 |
| | B ₂ 36-68 | 69 | 2,2 | 22 |
| Лугово-черноземная почва (п.п.) | A _d 0-3 | 83 | 4,9 | - |
| | A 3-21 | 67 | 2,0 | 25 |
| Аллювиальная луговая (а.п.) | B 21-65 | 73 | 2,7 | 12 |
| | A 3-10 | 78 | 3,6 | 36 |
| луговая (а.п.) | Bca10-20 | 83 | 5,0 | 29 |
| | BCa 20-55 | 78 | 3,6 | 20 |

По результатам мокрого просеивания на основе метода Савинова была разработана шкала для оценки водоустойчивости почвенных агрегатов по суммарному содержанию агрегатов >0,25 мм (%). По этой шкале удовлетворительной водоустойчивостью агрегатов в гумусовом горизонте характеризуется аллювиальная луговая почва (а.п.); в лугово-черноземных почвах водоустойчивость агрегатов недостаточно удовлетворительная по всему профилю; в подгумусовом горизонте почвы транзитной зоны – неудовлетворительная (табл. 2).

Выводы

Мерзлотные почвы южного склона увала Еравнинской котловины характеризуются суглинистым гранулометрическим составом. Частицы физической глины активно перемещаются по склону и аккумулируются в подножии в аллювиальной луговой почве.

Содержание гумуса в органогенном горизонте лугово-черноземной почве на вершине склона и в аллювиальной луговой почве высокое, в почве транзитной зоны – низкое. Распределение гумуса резко убывающее вниз по профилю.

При сухом просеивании в почве, независимо от местоположения на склоне содержание агрономически ценных агрегатов высокое и хорошая оструктуренность.

Под воздействием воды (мокрое просеивание) разрушаются агрегаты крупнее 2-1 мм и увеличивается содержание пылевой фракции.

Водоустойчивость агрегатов удовлетворительная в аллювиальной луговой почве в аккумулятивной зоне, в почвах верхних позиций недостаточно удовлетворительная, что является показателем слабой устойчивости мерзлотных почв, формирующихся в склоновом рельефе к эрозии.

Литература

- Бадмаев Н.Б., Куликов А.И., Корсунов В.М. (2006) Разнообразие почв криолитозоны Забайкалья. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятск. научн. центра СО РАН, 2006. – 165 с.
Дармаева Н.Н., Бадмаев Н.Б. (2014) Агрофизические и реологические свойства мерзлотных почв – Улан-Удэ: изд-во БГСХА им.В.Р. Филиппова.



- Десяткин Р.В. О возможных трансформациях почвенного покрова криолитозоны в условиях глобальных изменений (2009) // *Разнообразие мерзлотных и сезоннопромерзающих почв и их роль в экосистемах: материалы V междунар. конф. по криопедологии.* – Москва – Улан-Удэ, – С. 40.
- Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Чимитдоржиева Г.Д.(2008) Органическое вещество почв Забайкалья. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, – 205 с.
- Куликов А.И., Дугаров В.И., Корсунов В.М. (1997) Мерзлотные почвы: экология, теплоэнергетика и прогноз продуктивности. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. – – 312 с.
- Пигарева Н.Н., Швецова Н.Е. (2013) Продуктивность луговых ценозов и плодородие мерзлотных почв Бурятии при применении минеральных удобрений // *Агрохимия.* – – № 5. – С. 18-24.
- Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. (2003) Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // *Почвоведение.* – – № 1. – С. 53-61.



УДК631.412

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРЬИРОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВ И ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД ТРЁХ РАЙОНОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Дядькина С.Е.¹, Кондрашкина М.Е.¹, Кротов Д.Г.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

²Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Российская Федерация

S.E.Dyadkina@mail.ru

SPATIAL VARIATION IN THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SOILS AND SOIL-FORMING ROCKS OF THE THREE DISTRICTS OF THE BRYANSK REGION

Dyadkina S.E., Kondrashkina M.I., Krotov D.G.

Moscow State University, Bryansk State agraric University

Annotation: The variation of granulometric composition of gray forest soils on different soil-forming rocks with high repetition is considered. It is noted that the variation of the content of individual fractions can reach 100 or more %

Гранулометрический состав влияет на все свойства и режимы почвы, а, следовательно, и классификационную принадлежность почвы. С другой стороны, гранулометрический состав – это свойство, достаточно трудоёмкое для определения, и поэтому не так часто анализируемое.

В Брянской области почвообразующие породы представлены преимущественно четвертичными отложениями: лёссовидными и покровными суглинками, водноледниковыми, делювиальными, древнеаллювиальными и аллювиальными отложениями. Наибольшее распространение на территории изученных районов получили лёссовидные и покровные суглинки и водноледниковые отложения. В сумме в каждом районе площади, занимаемые этими почвообразующими породами, превышают 70 %. Лёссовидные распространены вдоль правого берега р. Десны (Брянское ополье) отложениями мощностью от 2 до 10-12 м. На них формируются высоко плодородные серые лесные почвы. Покровные суглинки встречаются на территории Трубчевского и преобладают на территории Выгоничского района. На покровных суглинках развиваются, в основном, дерново-подзолистые и иногда серые лесные почвы.

В данном исследовании анализировали данные почвенного обследования, проводимого на территории Брянской области в 1981-1983 гг Брянским филиалом института ЦентрГИПРОзем (Брянский, Выгоничский, Трубчевский районы). Почвенные разрезы характеризуют в основном обрабатываемые сельскохозяйственные земли.

Гранулометрический состав определялся в пробах, отобранных в почвенных разрезах в соответствии с почвенными горизонтами методом Н.А. Качинского. Общее число полнопрофильных разрезов с подстилающей почвообразующей породой составляет 119 штук.

Статистическая обработка проводилась в пакете STATISTICA 10 и Excel.

Для определения гранулометрического состава почвы довольно часто используется пипет-метод Н.А. Качинского. Однако он довольно трудоёмок и редко имеет повторности, поэтому исследователь не всегда может утверждать, что различия в гранулометрическом составе почв действительно существуют, а не являются ошибкой измерений. Основная масса ошибок приходится на песчаную фракцию, т.к. она определяется по разности. Допустимыми



относительными ошибками для почв песчаного гранулометрического состава считаются относительные ошибки до 3% при прямом определении фракции (0,25-0,05мм), и до 5-8% - в суглинистых и глинистых почвах (Дмитриев Е.А., Манучаров А.С., 1967 год).

Таблица 1. Статистические характеристики гранулометрического состава почвообразующих пород (%)

| | 1-0.25 | 0.25-0.05 | 0.05-0.1 | 0.01-0.05 | 0.05-0.001 | <0.001 |
|----------------------------------|--------|-----------|----------|-----------|------------|--------|
| лессовидный суглинок N=57 | | | | | | |
| среднее | 0.39 | 7.09 | 66.5 | 7.6 | 6.71 | 11.7 |
| дисперсия | 0.08 | 27.21 | 28.54 | 20.9 | 9.29 | 16.99 |
| коэфф вариации | 73.38 | 73.52 | 8.03 | 60.12 | 45.44 | 35.23 |
| ошибка среднего | 0.04 | 0.69 | 0.71 | 0.61 | 0.40 | 0.55 |
| покровный суглинок N=12 | | | | | | |
| среднее | 3.13 | 16.22 | 54.93 | 4.55 | 6.12 | 15.06 |
| дисперсия | 9.59 | 88.91 | 132.14 | 7.24 | 13.55 | 34.14 |
| коэфф вариации | 98.81 | 58.15 | 20.93 | 59.14 | 60.18 | 38.8 |
| ошибка среднего | 0.89 | 2.72 | 3.32 | 0.78 | 1.06 | 1.69 |
| среднее | 4.4 | 33.27 | 19.33 | 5.5 | 18.57 | 18.93 |
| дисперсия | 27.43 | 245.44 | 191.32 | 37.11 | 9.26 | 1.26 |
| коэфф вариации | 119.03 | 47.09 | 71.54 | 110.76 | 16.39 | 5.94 |
| ошибка среднего | 3.02 | 9.05 | 7.99 | 3.52 | 1.76 | 0.65 |

Таблица 2. Статистические характеристики гранулометрического состава некоторых типов почв

| Серые лесные на лессовидном суглинке | | | | | | |
|---|--------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|
| | 1-0.25 | 0.25-0.05 | 0.05-0.01 | 0.01-0.005 | 0.005-0.001 | <0.001 |
| Апах N=86 | | | | | | |
| среднее | 1.35 | 10.39 | 62.26 | 6.68 | 8.27 | 11.75 |
| дисперсия | 4.37 | 92.53 | 94.72 | 8.60 | 54.05 | 10.74 |
| коэфф вар | 154.30 | 92.62 | 15.63 | 43.91 | 88.91 | 27.88 |
| ошибка среднего | 0.23 | 1.04 | 1.05 | 0.32 | 0.79 | 0.35 |
| A1A2 N=52 | | | | | | |
| среднее | 0.97 | 8.56 | 63.04 | 6.79 | 7.32 | 13.31 |
| дисперсия | 4.21 | 118.77 | 120.61 | 13.08 | 7.34 | 18.48 |
| коэфф вар | 211.31 | 127.35 | 17.42 | 53.25 | 37.02 | 32.30 |
| ошибка среднего | 0.28 | 1.51 | 1.52 | 0.50 | 0.38 | 0.60 |
| A2B N=24 | | | | | | |
| среднее | 0.75 | 7.45 | 62.28 | 7.50 | 6.92 | 15.11 |
| дисперсия | 1.55 | 43.78 | 53.69 | 9.22 | 11.70 | 17.11 |
| коэфф вар | 166.16 | 88.86 | 11.76 | 40.51 | 49.46 | 27.38 |
| ошибка среднего | 0.25 | 1.35 | 1.50 | 0.62 | 0.70 | 0.84 |
| B1 N=72 | | | | | | |
| среднее | 0.84 | 8.47 | 61.33 | 6.12 | 7.10 | 16.13 |



| | | | | | | |
|---|--------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|
| дисперсия | 3.34 | 101.05 | 121.55 | 8.76 | 14.58 | 21.70 |
| коэфф вар | 217.86 | 118.65 | 17.98 | 48.38 | 53.75 | 28.88 |
| ошибка среднего | 0.22 | 1.18 | 1.30 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| | B2 | N=51 | | | | |
| среднее | 1.13 | 7.59 | 64.59 | 6.42 | 6.28 | 13.97 |
| дисперсия | 5.63 | 83.13 | 122.97 | 8.37 | 12.20 | 22.45 |
| коэфф вар | 210.00 | 120.18 | 17.17 | 45.05 | 55.61 | 33.91 |
| ошибка среднего | 0.33 | 1.28 | 1.55 | 0.41 | 0.49 | 0.66 |
| | C | N=68 | | | | |
| среднее | 0.67 | 7.40 | 66.79 | 7.22 | 6.48 | 11.44 |
| дисперсия | 2.87 | 40.31 | 50.70 | 8.24 | 9.78 | 18.28 |
| коэфф вар | 252.47 | 85.78 | 10.66 | 39.77 | 48.28 | 37.38 |
| ошиб сред | 0.21 | 0.77 | 0.86 | 0.35 | 0.38 | 0.52 |
| | BC | N=11 | | | | |
| среднее | 0.39 | 9.50 | 64.00 | 5.34 | 3.93 | 16.85 |
| дисперсия | 0.41 | 29.70 | 27.44 | 7.01 | 10.11 | 23.40 |
| коэфф вар | 164.78 | 57.37 | 8.18 | 49.62 | 80.96 | 28.72 |
| ошибка среднего | 0.19 | 1.64 | 1.58 | 0.80 | 0.96 | 1.46 |
| Серые лесные на покровном суглинке | | | | | | |
| | 1-0.25 | 0.25-0.05 | 0.05-0.01 | 0.01-0.005 | 0.005-0.001 | <0.001 |
| | Апах | N=11 | | | | |
| среднее | 6.60 | 21.61 | 46.33 | 6.85 | 7.13 | 11.48 |
| дисперсия | 27.46 | 239.55 | 306.41 | 5.86 | 1.95 | 9.71 |
| коэфф вар | 79.40 | 71.62 | 37.78 | 35.32 | 19.57 | 27.13 |
| ошибка среднего | 1.58 | 4.67 | 5.28 | 0.73 | 0.42 | 0.94 |
| | A1A2 | N=8 | | | | |
| среднее | 4.33 | 17.78 | 50.39 | 8.60 | 8.63 | 10.29 |
| дисперсия | 17.78 | 355.68 | 329.52 | 29.53 | 12.01 | 8.25 |
| коэфф вар | 97.49 | 106.10 | 36.03 | 63.19 | 40.17 | 27.92 |
| ошибка среднего | 1.49 | 6.67 | 6.42 | 1.92 | 1.23 | 1.02 |
| | B | N=7 | | | | |
| среднее | 5.10 | 20.21 | 48.57 | 5.69 | 8.94 | 11.49 |
| дисперсия | 22.40 | 323.45 | 363.71 | 7.45 | 7.74 | 5.75 |
| коэфф вар | 92.79 | 88.97 | 39.26 | 48.02 | 31.12 | 20.89 |
| ошибка среднего | 1.79 | 6.80 | 7.21 | 1.03 | 1.05 | 0.91 |
| | BD-D | N=12 | | | | |
| среднее | 6.82 | 28.07 | 37.59 | 5.76 | 8.03 | 13.74 |
| дисперсия | 75.38 | 978.71 | 639.36 | 11.52 | 17.94 | 60.10 |
| коэфф вар | 127.37 | 111.46 | 67.26 | 58.95 | 52.78 | 56.42 |
| ошибка среднего | 2.51 | 9.03 | 7.30 | 0.98 | 1.22 | 2.24 |

Варьирование гранулометрического состава зависит от исследованной площади (Кротов Д.Г., Самсонова В.П., 2009). В нашем случае имеются данные трёх районов



Брянской области. Мы рассмотрим гранулометрический состав серых лесных почв, образованных на лессовидных (86 разрезов) и покровных суглинках (11 разрезов).

Во многих работах выводы основаны на результатах определения гранулометрического состава в одном разрезе. У нас есть возможность рассмотреть, как сильно может варьировать содержание различных фракций в выборках большего объема в одинаковых горизонтах одного типа почв на одинаковых почвообразующих породах.

Сама по себе ошибка в 0,23% кажется маленькой, но если разделить ее величину на среднее, и получить относительную ошибку, то получится, что она составляет целых 17%, да и коэффициент вариации в 154% весьма велик. Это ошибка в содержании песчаной фракции в горизонте Апах. Самое сильное варьирование наблюдается в песчаной фракции горизонта С и достигает 252% (серые лесные почвы на лессовидных суглинках).

Можно рассмотреть и другие фракции. Содержание глинистой фракции варьируется во всех горизонтах, согласно коэффициенту вариации, не менее, чем на 20,9% (горизонт В в серых лесных почвах на покровных суглинках).

Меньше всего колеблется содержание крупной пыли в почвах на лессовидных суглинках. В горизонте ВС оно опускается до 8,18%, но в среднем изменяется от 11 до 18%. На покровных суглинках содержание этой же фракции варьирует в два раза сильнее. Коэффициент вариации не опускается ниже 36%. Очевидно, эти низкие значения связаны с самым высоким количеством частиц этого размера в почве (более 60%).

Фракции, содержание которых в почве не превышает 20-30%, варьируют гораздо сильнее. Иной раз коэффициент вариации достигает 100% и более (песчаные фракции всех горизонтов почв на лессовидных суглинках и ВD-D горизонта почв на покровных суглинках).

Таким образом, делая выводы о гранулометрическом составе, также, как и о других свойствах почв, желательно делать поправку на ошибки измерений.

Литература

- Дмитриев Е.А., Манучаров А.С. О точности механического анализа почв методом пипетки//Вестник МГУ, сер.VI, 1967. № 4. С.109-116.
- Кротов Д.Г., Самсонова В.П. Пространственная изменчивость гранулометрического состава агросерых почв и агросерых со вторым гумусовым горизонтом// Вестник МГУ, сер.17, 2009. № 2.



УДК 631.41.0

«МОСТЫ» МЕЖДУ МИРОМ МИКРО И МАКРОЧАСТИЦ В ПОЧВЕ

Зубкова Т.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Москва, Россия
dusy.taz@mail.ru

Annotation: The structural organization of the soil makes it possible to trace the interaction of the components of different structural levels, to establish the patterns of the transfer of information about molecular contacts to the level of soil aggregates. The structural parameters of the soil set the direction of this process and play the role of a gateway. So, with the “minimal” interparticle contacting, the physical properties of the soil are the barrier, with the “maximum” - the transmission of molecular interactions to the strength properties of the aggregates is observed. Knowledge of these mechanisms for transmitting information in the soil makes it possible to predict changes in its ecological functions as a result of various types of impacts. It was established that to determine the role of chemical properties in the soil macrostructures formation, it is recommended to compare soils with similar (close) physical properties. Otherwise, isolating the influence of the chemical factor will be problematic.

Введение

В почве выделяются несколько уровней структурной организации: молекулярно-ионный, агрегатный, горизонтный, уровень почвенного индивидуума (Воронин, 1979, 1986; Корнблум, 1975; Розанов, 1975). Такой иерархический подход стимулирует изучение подсистем каждого уровня организации почвы в их взаимоотношениях друг с другом и с почвенным профилем, расширяет возможности прогнозирования поведения почвы и управления ею. Каждый уровень организации не только внутренне структурирован, но и выступает в качестве элемента некоторой более крупной внешней структуры. В почвоведении иерархический подход чаще осуществляется в морфологической организации почвенной массы (Корнблум, 1975; Герасимова и др., 1992). Большинство исследований направлено на сравнительный анализ элементов одного и того же структурного уровня в разных почвах - это рН, ЕКО, гумус (ионно-молекулярный уровень), агрегатный состав (агрегатный уровень), плотность, твердость, морфологические свойства (горизонтный уровень). Гораздо меньше работ по взаимосвязи компонентов разных структурных уровней в пределах одного и того же почвенного профиля, хотя именно такой анализ позволяет установить структурные связи и механизмы образования высокоорганизованных агрегатных структур. Например, физические свойства агрегатов черноземов обыкновенных (плотность, прочность) зависят от свойств вмещающего их горизонта, но эта зависимость по-разному проявляется в пахотных и непашотных горизонтах. На целинных участках наблюдается пропорциональная связь твердости и плотности всех горизонтов почвы с аналогичными свойствами агрегатов. В пахотных горизонтах – обратная и менее тесная зависимость между этими параметрами. Причем, на характер связи влияет тип агрегатной структуры. В зернистой почве высокая вероятность максимальной твердости и плотности горизонта, в гомогенной, «бесструктурной» почве, - минимальные твердость и плотность (Зубкова, Карпачевский, 2001). Эти закономерности установлены для элементов почвы двух соседних структурных уровней: агрегатного и горизонтного. Связи между микроуровнем и макроуровнем гораздо сложнее, поскольку диапазон сравниваемых компонентов почвы слишком велик: от 10^{-7} до 10^2 мм. Как передаются свойства почвы между структурными уровнями от молекул до агрегатов, горизонта? Как построены и как строятся мосты между миром отдельных молекул



в почве и макроскопическими структурами? Размерные эффекты остаются одной из главных проблем не только в почвоведении, но и в фундаментальной химии (Бучаченко, 1999). Вопрос - как свойства индивидуальных частиц при объединении эволюционируют в свойства твердой фазы остается дискуссионным, и пока не имеет общего решения. Однако еще в 50-60-е годы стояла проблема синтеза твердых пористых тел, катализаторов для химических производств, и была создана теория физико-химической механики дисперсных систем (Ребиндер и др., 1964), получившая развитие в работах Амелиной и др. (1970), Осипова и др. (1979).

Цель представленной работы – установить связи между свойствами почвы молекулярного уровня и агрегатного и роль физических свойств в передаче информации от молекул до агрегатов.

Объекты исследования

Объект исследования – дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы (Московская обл), чернозем типичный среднесуглинистый (Курская обл), чернозем выщелоченный слитой, среднесуглинистый (Краснодарский край), чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый (Ростовская обл).

Методологические подходы и методы исследования

Фундаментальное уравнение физико-химической прочности пористых тел. Для решения поставленных задач были использованы физико-химическая теория прочности твердого пористого тела и концепция матричной организации почвы (Зубкова, 2002).

Согласно представлениям физико-химической механики дисперсных материалов, прочность твердых пористых тел зависит не столько от механических свойств минеральных частиц, сколько от силы сцепления между ними и числа контактов в единице площади сечения разрушения. Основное фундаментальное уравнение физико-химической механики устанавливает пропорциональную зависимость между прочностью дисперсной структуры P_c , усредненным значением силы контакта между частицами p_1 и числом разрушенных связей (контактов) χ : $P_c = p_1 * \chi$ (Осипов и др., 1979). Число и характер индивидуальных контактов – важнейшая характеристика любой структуры, определяющая ее прочностные, деформационные и другие свойства. Структура предлагаемой формулы прочности отражает тот факт, что прочность пористых тел зависит как от молекулярных свойств твердой фазы, так и от структурных параметров пористого тела. Тем самым макроскопическое понятие прочности материалов получило расшифровку в микромасштабе.

Механическая прочность агрегатов как отражение внутривидных связей. Механическая прочность почвенных агрегатов, как твердых пористых тел – характеристика макроморфологического структурного уровня. Она учитывает две группы принципиально различных свойств почвы – химические (свойства поверхности) и физические (структурные параметры). Характеристикой почвы с молекулярно-ионных позиций могут быть свойства почвенной матрицы: число активных центров (число контактов χ) и усредненная сила контакта (p_1). Агрегаты размером 1-10 мм представляют собой высокоорганизованные дисперсные структуры и характеризуются механической прочностью (P_c).

Экспериментально определяли механическую прочность агрегатов на приборе по типу пресса, модифицированная модель МП-2С (Зубкова, Карпачевский, 2001) и выражали в кПа. Число контактов χ рассчитывали по формулам: $\chi = 1/(2r)^2 * 1/n^2$ и $r = 3/p * S$, где r – средний радиус частиц в см; n - безразмерная величина, фактор упаковки, зависящий от порозности агрегатов, p - плотность твердой фазы почвы, г/см³, S - общая удельная поверхность, м²/г



(Зубкова, Карпачевский, 2001, с.213). Плотность почвы, удельную поверхность и порозность агрегатов определяли экспериментально традиционными методами физики почв. Усредненную силу единичного контакта получали расчетным путем.

Результаты

показали пропорциональную зависимость механической прочности агрегатов от числа контактов ($R^2=0,74$). Средняя сила индивидуального контакта между частицами в агрегате составляла $\sim 10^{-11} - 10^{-10}$ Н. Причем, p_1 уменьшалась с утяжелением гранулометрического состава: в почвах среднеглинистых $p_1 \sim 0,6-1,2 \cdot 10^{-10}$ Н, тяжелосуглинистых $p_1 \sim 1,0-1,3 \cdot 10^{-10}$ Н и среднесуглинистых $p_1 \sim 3,0-4,7 \cdot 10^{-10}$ Н.

Усредненная сила индивидуального контакта влияла на прочность целого агрегата лишь в определенных диапазонах структурных параметров: в легко- и среднесуглинистых почвах не обнаружено пропорциональной зависимости, в тяжелосуглинистых почвах вероятность такой связи составляла 38%, а в среднеглинистых – 96%. Из этого следует, что межчастичное контактирование (оценивается числом контактов), характерное для почв тяжелосуглинистых и глинистых, создает условия для трансляции молекулярных свойств (сила единичного контакта) на агрегатный уровень (прочность агрегата).

Предложено оценивать степень межчастичного контактирования как «минимальное», «среднее» и «максимальное». «Работу» этого фактора в природных условиях можно продемонстрировать таким примером: полив тяжелосуглинистых черноземов слабозасоленными речными водами приводит к изменениям в ППК. Это сравнительно быстро (5-15 лет) отражается на агрегатном и горизонтном уровне появлением признаков слитости. В среднесуглинистых черноземах слитость может не развиваться, хотя химические изменения в ППК имеют место. И связано это со слабой степенью межчастичного контактирования, которая не обеспечивает быструю трансляцию молекулярных свойств на строение агрегатов и почвенного профиля.

Заключение

Таким образом, структурная организация почвы позволяет проследить взаимодействие компонентов разных структурных уровней, установить закономерности передачи информации о молекулярных контактах на уровень почвенных агрегатов. Структурные параметры почвы задают направленность этого процесса и играют роль шлюза. Так, при «минимальном» межчастичном контактировании физические свойства почвы являются барьером, при «максимальном» – наблюдается трансляция молекулярных взаимодействий на прочностные свойства агрегатов. Знание этих механизмов передачи информации в почве позволяет прогнозировать изменение ее экологических функций в результате различных видов воздействий.

Второй важный вывод носит методологический характер: для определения роли химических свойств в формировании почвенных макроструктур будет корректным сравнивать почвы с близкими физическими свойствами (гранулометрический состав, общая удельная поверхность, порозность и степень межчастичного контактирования). В противном случае влияющих факторов будет как минимум два – это химические свойства поверхности и структурные параметры. Причем, вычленив каждый из них будет проблематично.

Литература

Амелина Е.А., Щукин Е.Д. Изучение некоторых закономерностей формирования контактов в пористых дисперсных структурах // Коллоидный журнал. 1970 г., т.32, №6, с. 795-800.



- Бучаченко А.Л. Химия на рубеже веков: свершения и прогнозы // Успехи химии. Т.68 (2). 1999. С.99-118
- Воронин А.Д. Методологические принципы и методическое значение концепции иерархии структурных уровней организации почвы // Вестник МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1979, №1, с. 3-10
- Воронин А.Д. Основы физики почв. М. Изд. МГУ. 1986, 244 с.
- Герасимова М.И., губин С.В., Шоба С.А. Микроморфология почв природных зон СССР. Пущино. 1992, 215 с.
- Зубкова Т.А. Матричная организация почв и ее экологическое значение. Автореф. диссер. доктора биол. наук. Москва. Изд. ООО «МАКС Пресс» 2002, 42 с.
- Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М. Изд.«Русаки». 2001 г., 296 с.
- Корнблум Э.А. основные уровни морфологической организации почвенной массы // Почвоведение. 1975. №9, с.36-48
- Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М. Изд. МГУ. 1979, 232 с.
- Ребиндер П.А., Щукин Е.Д., марголис Л.Я. О механической прочности пористых дисперсных тел. Докл. АН СССР. 1964. Т.154, №3. С. 695-698.
- Розанов Б.Г. генетическая морфология почв. М. Изд. МГУ. 1975



УД 631. 417

ХАРАКТЕРИСТИКА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ БРЯНСКОГО ОПОЛЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИХ ПОЛИГЕНЕТИЧНОСТИ

Ковалева Н.О.¹, Ковалев И.В.²

^{1,2}Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
natalia_kovaleva@mail.ru, kovalevmsu@mail.ru

CHARACTERISTICS OF THE AGROGRAY SOILS SOLID PHASE OF THE BRYANSK OPOL'E AS A
REFLECTION OF THEIR POLYGENETICITY

Kovaleva N.O., Kovalev I.V.

Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Moscow, Russia

Annotation: The solid phase of agro-gray soils was studied in the paper. Textural differentiation of soil profiles was observed by the granulometric fractions content. The features of second humus horizon formation were described on the basis of granulometric composition, mineralogy, specific surface area studying. Such characteristics as texture similarity index and loessation coefficient are also involved for this purpose.

Введение

Проблема генезиса почв ополей Центральной России остается остро дискуссионной до настоящего времени. Существует более десятка теорий происхождения вторых гумусовых горизонтов в их профилях – палеопойменная, золовая, иллювиальная, палеокриогенная и другие. Среди почв ополей Русской равнины (Владимирского, Подольско-Коломенского, Пущинского и др.) особняком стоят почвы Брянского ополя, потому что специфический рельеф последних, самый древний, сформирован еще днепровским оледенением. Именно поэтому он наиболее контрастный, микрозападины и микроповышения не сглажены, как во Владимирском ополе, а гумусовый горизонт превосходит по мощности своих северных аналогов. Возраст экспонированных поверхностей, наряду с многообразием окислительно-восстановительных обстановок, создают уникальные условия для изучения трансформации твердой почв ополей, реконструкции палеоэкологической обстановки изучаемой территории.

Объекты и методы

Объектом исследования стала catena геохимически сопряженных ландшафтов Трубчевского ополя Брянской области (микроповышение- микропонижение-склон-депрессия) (52°34'79" с.ш., 33°38'56" в.д.). В катену включены почвенные разности, сформированные в различных гидрологических условиях по классификации 2004 г.: автоморфные агросерые почвы микроповышений водораздела (разрезы 4, 1-08, 7. Высота 182 м над уровнем моря); полугидроморфные агросерые почвы со вторым гумусовым горизонтом микрозападин водораздела (разрезы 3, 6, 2-08. Высота 175 м над ур. м.); гидроморфные агросерые глееватые почвы (по классификации 1977 г. – темно-серая глеевая почва) ложбин стока (разрезы 8 и 3-08; 52°34'43" с.ш., 33°39'51" в.д., высота 142 м над ур. м). Лёссовидные суглинки и лёсс являются материнскими породами наиболее типичных почв Трубчевского ополя (Ковалев, Ковалева, 2019).

Определение гранулометрического состава, удельной поверхности почв выполнялось классическими методами. По изотерме десорбции паров воды была рассчитана общая удельная поверхность почвы (по БЭТ) в области относительных давлений P/P_0 0.05-0.35. Внешняя удельная поверхность (по Фаррэру) – в области относительных давлений P/P_0 0.55-



0.98 (Воронин, 1986). Валовое содержание макроэлементов – рентгенофлюоресцентным методом на приборе Tefa-6111.

Результаты и обсуждение

Наиболее характерный и существенный признак ландшафтов Брянского ополья – это резко выраженный микрорельеф в виде блюдца и западина, который обуславливает особенности водного режима. Выявлена контрастность водного режима на разных элементах рельефа. Анализ гранулометрического состава (табл. 1, 2) обнаруживает текстурную дифференциацию во всех изучаемых почвах. Существует ещё один критерий оценки однородности, использующийся для доказательства литологической непрерывности – индекс текстурного подобия (табл. 2), предложенный Langohr, Van Vliet, (1979) (Ковалев, Ковалева, 2019). Индекс представляет собой сумму минимальных значений всех фракций гранулометрического состава в двух сравниваемых образцах. Расчет индекса показал различный генезис нижних и верхних горизонтов профиля агросерой со вторым гумусовым горизонтом почвы микрозападины. Характерно, что второму гумусовому горизонту свойственны наибольшие значения коэффициента облесованности (табл. 2). Скорее всего, верхняя и нижняя часть профиля формировались из гетерохронных толщ лёсса различного происхождения. Неоднородность горизонтов также усилена подзолистым процессом, а горизонтов Ap и A – антропогенным воздействием. В почве микроповышения все горизонты со средними значениями коэффициента облесованности литологически однородны (табл. 2), за исключением пахотного горизонта. Но это различие объясняется антропогенным влиянием. Отсутствие дифференциации, предположительно, вызвано легким гранулометрическим составом горизонтов этой почвы. В местах соприкосновения бывших «внутренних блоков», к которым приурочены агросерые почвы на микроповышении, наблюдается слабая облесованность нижних горизонтов. Неоднородность горизонтов агросерой глееватой почвы в нижней части склона связана с дезагрегацией почвенных частиц при интенсивном оглеении. Именно оглеенным горизонтам свойственны самые низкие значения коэффициента облесованности (табл. 2), они в наименьшей степени были подвержены криогенному выветриванию.

Разнородность почв по катене наблюдается и в более подробном анализе по П.Н. Березину, (1987), из которого следует, что глинные компоненты являются наиболее динамичной частью твердого вещества почв и почвообразующих пород. В изучаемых почвах показатель K очень высок, глинные компоненты всех горизонтов грубодисперсны. Содержание глинных компонентов (Ф5) в разрезе микропонижения возрастает с глубиной, максимум приурочен ко второму гумусовому и подпахотному горизонтам. Количество глинных компонентов резко убывает к породе. В агросерой почве на микроповышении максимум содержания глинных компонентов относится к горизонту В, минимум – к ВС горизонту почвы микроповышения, что также свидетельствует о дифференцированности данных почв (табл. 1).

Песчаные компоненты, наоборот, являются наиболее устойчивой к разрушению частью гранулометрического состава почв и почвообразующих пород. Их содержание отражает длительность и интенсивность воздействия разрушающих факторов. Содержание песчаных компонентов в агросерой почве со вторым гумусовым горизонтом и в агросерой почве на микроповышении довольно велико, что свидетельствует о невысокой степени переработанности их материала. Во всех горизонтах изучаемых почв эти компоненты грубодисперсны. Наиболее грубый материал соответствует горизонтам АЕ и В почвы микрозападины, наименее – горизонту АВ микроповышения.



Таблица 1. Характеристика распределения гранулометрических элементов

| Горизонт, глубина, см | Глинные компоненты | | Песчаные компоненты | | Название почвы по гранулометрическому составу |
|---|-----------------------|------|------------------------|------|---|
| | Ф ₅ | К | α, мкм | п | |
| Агросерая со вторым гумусовым горизонтом в микропонижении | | | | | |
| Ap, 0–30 | 28.5 | 0.60 | 39.0 | 3.27 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, среднеотсортированный |
| A, 30–61 | 35.1 | 0.61 | 46.5 | 3.10 | Суглинок средний, грубодисперсный, среднезернистый, среднеотсортированный |
| A[hh], 61–92 | 43.7 | 0.62 | 33.5 | 2.57 | Суглинок тяжелый, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| AE[hh], 92–143 | 20.9 | 0.82 | 34.5 | 2.57 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| B, 143–150 | 23.0 | 0.88 | 35.0 | 2.57 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| C, 150–200 | 26.4 | 0.56 | 39.0 | 2.96 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| Агросерая почва на микроповышении | | | | | |
| Ap, 0–20 | 22.8 | 0.60 | 42.0 | 2.96 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| A, 20–52 | 22.8 | 0.60 | 42.0 | 2.96 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, слабоотсортированный |
| AB, 52–88 | 18.2 | 0.62 | 43.0 | 2.96 | Супесь, грубодисперсная, среднезернистая, слабоотсортированная |
| B, 88–142 | 24.5 | 0.53 | 42.5 | 3.27 | Суглинок легкий, грубодисперсный, среднезернистый, среднеотсортированный |
| BC, 142–170 | 15.2 | 0.56 | 39.7 | 2.82 | Супесь, грубодисперсная, среднезернистая, слабоотсортированная |

Примечание: Ф₅-содержание глинных компонентов (<0.005 мм); К – характер глинных компонентов; α – медианный диаметр песчаных компонентов, мкм (зернистость); п – отсортированность песчаных компонентов

Зернистость песчаных компонентов средняя в обоих профилях, приближается к грубозернистому, подпахотный горизонт почвы микрозападины, к тонкозернистому – второй гумусовый горизонт в микрозападине. При одинаковых условиях средний диаметр песчаных компонентов свидетельствует о времени, в течение которого исходная порода подвергалась действию формирующих факторов. С усилением процессов гипергенеза (и почвообразования) увеличивается отсортированность песчаных компонентов. В исследованных почвах отсортированность, в основном, слабая. Она несколько увеличивается лишь в современных гумусовых горизонтах почвы микрозападины (видимо, за счет антропогенного фактора) и в горизонте АВ на микроповышении.

Таким образом, резкие различия в анализируемых показателях говорят о гетерохронности и полигенетичности гумусовых горизонтов. Наиболее тяжелый состав второго гумусового горизонта почвы микрозападины, максимум содержания в нем глинных компонентов, наименьшая величина показателя зернистости и высокая – коэффициента облессованности свидетельствуют о высокой переработанности материала криогенными процессами. Уменьшение зернистости и усиление отсортированности сопровождается изменением минералогического состава к преимущественно кварцевому с участием других прочных минералов (Ковалев, Ковалева, 2019).



Таблица 2. Коэффициент облесованности и индекс текстурного подобия, молекулярные соотношения полуторных оксидов и кварца к илу, характеристика удельной поверхности агросерых почв Брянского ополья

| Горизонт, глубина, см | Коэфф. облесован ности | Индекс текстур ного подобия | [R ₂ O ₃]/ [ил] | [SiO ₂]/ [ил] | St (полная) м ² /Г | Se (внешняя) | Si (внутрен няя) |
|---|------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|
| Агросерая почва на микроповышении | | | | | | | |
| Ap, 0–30 | 0.70 | | 1.58 | 8.82 | 45.6 | 34.0 | 11.6 |
| AE, 30–35 | 0.57 | 86.7 | 2.04 | 9.42 | 45.0 | 28.7 | 16.3 |
| EB, 36–46 | 0.61 | 95.5 | 1.44 | 7.39 | 51.9 | 33.6 | 18.3 |
| B1, 46–85 | 0.52 | 89.4 | 0.79 | 4.47 | 54.8 | 48.9 | 6.0 |
| B2, 85–99 | 0.59 | 92.5 | 1.16 | 6.51 | 39.9 | 32.1 | 1.8 |
| BC, 99–120 | 0.54 | 90.8 | 1.47 | 9.18 | 33.1 | 17.8 | 15.2 |
| Агросерая почва со вторым гумусовым горизонтом в микропонижении | | | | | | | |
| Ap, 0–30 | 0.71 | | 1.07 | 5.80 | 50.5 | 25.0 | 25.5 |
| AE, 30–50 | 0.59 | 76.5 | 1.34 | 7.98 | 58.7 | 13.7 | 26.7 |
| A[hh], 50–85 | 0.76 | 75.8 | 0.64 | 4.11 | 68.4 | 31.6 | 36.9 |
| EB[hh], 85–125 | 0.71 | 80.5 | 12.62 | 78.80 | 31.8 | 23.9 | 7.8 |
| EB, 125–140 | 0.73 | 90.3 | 2.75 | 15.21 | 52.4 | 43.8 | 8.6 |
| B, 140–175 | 0.71 | 92.2 | 1.36 | 7.51 | 33.4 | 32.6 | 0.8 |
| C, 175–220 | 0.69 | 97.5 | 1.52 | 7.99 | 48.4 | 45.8 | 2.5 |
| Агросерая глееватая почва в ложбине стока | | | | | | | |
| Arg', 10–40 | 0.78 | | 0.83 | 6.34 | 88.4 | 40.7 | 47.7 |
| A[hh]g', 40–60 | 0.48 | 72.6 | 0.49 | 3.78 | 94.6 | 44.3 | 50.3 |
| AEg'', 60–80 | 0.48 | 91.9 | 0.30 | 2.99 | 28.4 | 15.3 | 13.2 |

По молекулярным соотношениям [SiO₂]/[ил], [R₂O₃]/[ил] (табл. 2) можно судить о том, что на формирование агросерых почв микроповышений оказывают влияние процессы оподзоливания, которые начались после формирования гумусовых горизонтов. Максимальные значения соотношения [R₂O₃]/[ил] в гор. AE характеризуют его контрастный окислительно-восстановительный режим в ранневесенний период. Бимодальное распределение по профилю соотношений [SiO₂]/[ил] и [R₂O₃]/[ил] в агросерой со вторым гумусовым горизонтом почве микропонижения показывает, что, несмотря на наличие процессов оподзоливания, очень большое влияние на формирование почв микропонижений оказывают современные условия увлажнения этих почв. В профиле агросерой глееватой почвы соотношение [SiO₂]/[ил] убывает с глубиной, что объясняется дезагрегацией минеральной части почвы при оглеении и выносе минеральных частиц за пределы профиля в условиях застойно-промывного водного режима. Распределение величин соотношения [R₂O₃]/[ил], как и соотношения [SiO₂]/[ил], характеризуется равномерным убыванием вниз по профилю. Но при этом достигаются минимальные значения по сравнению с почвами водораздельных ландшафтов. В оглеенных горизонтах эти соотношения достигают наименьших отметок, обусловленных не только условиями почвообразования (глееобразования), но и привнесением высокодисперсных илестых частиц с водораздельных ландшафтов.

Показано, что величины удельной поверхности хорошо коррелируют с результатами анализа гранулометрического состава почв – с содержанием и распределением илестых



частиц ($r=0.76-0.78$, $P=0.99$), и с содержанием гумуса ($r=0.70-0.95$, $P=0.99$). Так, максимальному значению величины удельной поверхности (54.8 м^2) в агросерой почве на микроповышении в горизонте В соответствует и максимальное значение содержания илистой фракции (15.9 %). Сходная корреляционная зависимость между величиной удельной поверхности и гранулометрическим составом почв наблюдается во вторых гумусовых горизонтах агросерых почв микрозападин. При этом во вторых гумусовых горизонтах преобладают величины внутренней удельной поверхности над внешней, что связано не только с повышенным содержанием гумуса, но и его качественным составом: гуматным характером, максимальной степенью окисленности лигниновых фенолов (Ковалев, 2015).

Гумусовые горизонты агросерой глееватой почвы ложбины стока характеризуются наибольшими значениями удельной поверхности, что обусловлено повышенным содержанием гумуса и максимальным содержанием несиликатного железа. В то же время, удаление несиликатного железа при оглеении приводит к дезагрегации почвенных частиц и в соответствии с этим к возрастанию значений удельной поверхности. При отсутствии однозначной взаимосвязи между величинами удельной поверхности и содержанием разных форм железа в почвах катены установлено, что оглеенным горизонтам тяжелосуглинистых почв присущи минимальные значения удельной поверхности; им же соответствуют наименьшие количества всех форм соединений железа.

Выводы

1. Распределение элементов гранулометрического состава, значений коэффициента облессованности, индекса текстурного подобия по элементам рельефа и по профилю агросерых почв Брянского ополья отражают их полигенетичность, диагностируя дневной характер вторых гумусовых горизонтов в прошлом.

2. Наиболее тяжелый гранулометрический состав второго гумусового горизонта агросерой почвы микрозападины, максимум содержания в нем глинных компонентов, наименьшая величина показателя зернистости и высокая – коэффициента облессованности свидетельствуют о значительной переработанности материала криогенными процессами и гетерохронности по сравнению с дневными.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-14-01120

Литература

- Березин П.Н. (1986) Гранулометрия почв и почвообразующих пород // Современные физические и химические методы исследования почв. М.: Изд-во МГУ. С. 56–73.
- Воронин А.Д. (1986) Основы физики почв: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ. 244 с.
- Ковалев И.В., Ковалева Н.О. (2019) Характеристика твердой фазы агросерых почв (на примере почв Брянского ополья) // *Российский журнал прикладной экологии* №1, С. 26-33.



УДК 631.4.

ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ И ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИ ВОВЛЕЧЕНИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Которова М.С.^{1,2}, Умарова А.Б.¹, Початкова Т.Н.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

² «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», Москва, Российская Федерация

mkotorova.igce@gmail.com

CHANGES IN THE RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SOD-PODZOLIC AND CHERNOZEM SOILS WITH INVOLVEMENT IN AGRICULTURAL USE

Kotorova M.S.^{1,2}, Umarova A.B.¹, Pochatkova T.N.¹

¹Faculty of soil science Moscow state University, Moscow, Russia

² Yu. A. Israel Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

Annotation: Представлены результаты сравнительного исследования дерново-подзолистой почвы, чернозема типичного и чернозема слитого в условиях разного землепользования. При анализе физико-механических свойств в цикле нагрузка-разгрузка выявлено, что прочностные свойства менее выражены у почв аграрного назначения. Почвы, имеющие наибольший процент содержания физической глины обладают высокой способностью к восстановлению почвенной структуры.

Введение

Пахотные почвы находятся в состоянии постоянного изменения их физико-механических свойств не только под воздействием климатических и биологических факторов, но и при использовании сельскохозяйственной техники [5]. Интенсивное сельскохозяйственное использование без соответствующих компенсационных мер ведет к потере гумуса, снижению водоустойчивости агрегатов, трансформации гранулометрического состава [1, 6]. Так, исследования агроландшафтов Курской области [2] показали, что большая часть черноземов, вовлеченных в активное сельскохозяйственное землепользование, деградирует. Изменения вышеуказанных базовых свойств почв влияют на прочность структуры и на тип структурных связей, что и определяет реологическое поведение почв. В лабораторных условиях возможно детальное исследование деформационного поведения почв путем проведения экспериментов в циклах воздействия нагрузка - разгрузка. Рост интереса к исследованию реологических свойств почв обусловлено возможностью оценить прочность структурных связей, прогнозировать их поведение при различных воздействиях, выявить особенности реологического поведения почв, вовлеченных в сельскохозяйственную деятельность. Целью работы явилось исследование изменения реологического поведения почв при сельскохозяйственном использовании на примере дерново-подзолистых и черноземных почв.

Объекты и методы

Объектом исследования были почвы, находящиеся в разных условиях землепользования: агродерново-подзолистая почва (залежь (N 56.1313°; E 37.8035°)) и дерново-подзолистая почва (лес (N 56.098272°; E 37.821603°)) Пушкинского района Московской области; агрочернозем типичный (пашня (N 51.620201°; E 36.259689°)) и чернозем типичный (лесополоса (N 51.620361°; E 36.256514°)) Курской области (Курский



НИИ АП), агрочернозем слитой (пашня (44°43'15,9"N, 40°03'36,3"E) и залежь (N 44.43139°, E 40.03373°)) Майкопского района республики Адыгея.

Гранулометрический и микроагрегатный составы измеряли методом лазерной дифракции «Analysette 22 comfort» (Fritsch, Germany). Определение содержания общего углерода проводили на приборе экспресс анализатор углерода АН – 7529 методом сухого сжигания, плотность твердой фазы почвы с помощью пикнометров. Реологические свойства были изучены по реологическим кривым – кривым течения (основной и дополнительной), полученным на ротационном вискозиметре «РЕОТЕСТ – 2» с цилиндрическим измерительным устройством. Опыт проводили после суточного насыщения, когда влажность достигала величины капиллярной влагоемкости, и почва приобретала вязко-текучую консистенцию. Измерения проводились в течение 2 циклов, которые состояли из прямого хода (с 1 по 12 передача в диапазоне градиента скорости сдвига от 0,167 до 145,8 с⁻¹) и обратного (с 12 по 1 передача). Время деформирования на каждой скорости составило 3 минуты и 1 минута соответственно. Анализировались две реологические кривые: основная и дополнительная. Первая выражает зависимость напряжения сдвига (τ , Па) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$, 1/с). На основании данной кривой определялись: $P_{\kappa 1}$ - «предел Шведова» - начало течения почвенной суспензии; второе критическое напряжение сдвига $P_{\kappa 2}$ — начало разрушения; P_m — предел пластично-вязкого разрушения структуры, соответствующий практически полному разрушению структурных связей исследуемого образца [3, 4]. Дополнительная реологическая кривая выражает зависимость эффективной вязкости (η , Па*с) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$, 1/с). С помощью полученных значений вязкости определены параметры: $\eta_{P_{\kappa 1}}$ – вязкость начала течения (наибольшая структурная вязкость); η_{min} – минимальная структурная вязкость; $\eta_{кон}$ – конечная вязкость, которая соответствует наименьшей скорости деформации по обратной реологической кривой. Отношение $\eta_{кон}/\eta_{P_{\kappa 1}}$ характеризует способность структур к восстановлению, отношение $P_m/P_{\kappa 1}$ — прочность коагуляционных связей между почвенными частицами, отношение $P_{\kappa 1}/P_{\kappa 2}$ показывает наличие дилатантных свойств.

Результаты и обсуждение

Более дисперсными и менее микроагрегированными из всех исследованных в работе почв являются дерново-подзолистые почвы. В почвах, вовлеченных в сельскохозяйственное использование, содержание общего углерода заметно ниже, а плотность твердой фазы выше (табл.1). Содержание физической глины больше в черноземах, находящихся в активном аграрном пользовании. В дерново-подзолистой почве наблюдается более легкий гранулометрический состав в нативной почве.

На рис.1 представлены реологические кривые некоторых горизонтов для дерново-подзолистой почвы и чернозема слитого, находящиеся в условиях разного землепользования. Прямая ветвь фиксирует поведение почвы под нагрузкой, характер разрушения ее структуры, а обратная ветвь дает представление о способности почвы восстанавливать систему. Численные значения напряжения сдвига значительно выше в почвах, менее подверженных антропогенному воздействию.

На всех графиках можно увидеть петли дилатансии [7, 8], представляющие возрастание прочности структуры при уменьшении нагрузки при больших скоростях. Это связано с тем, что происходит разрушение связей между частицами, сдвиг частиц относительно друг друга, их переорганизация, приводящая к формированию более плотной упаковки частиц. Данное явление может сопровождаться самопроизвольным восстановлением исходного сопротивления деформации за счет сил тяжести по прекращению действия механических сил. Особое поведение отмечается у чернозема слитого (залежь) 20-40 см: на реологической



кривой обнаруживается разность в значениях напряжения сдвига начала и конца цикла, что свидетельствует о явлении тиксотропии [9]: восстановлении структуры после прекращения воздействия, причем после нагрузки структура восстанавливается почти полностью.

Таблица 1. Физические и химические свойства исследуемых почв

| Горизонт (глубина/мощность, см) | Содержание физической глины (< 0,01 мм), % | Гран. состав (по Н.А. Качинскому) | $C_{общ}$, % | P_s , г/см ³ |
|---|---|---|------------------|------------------------------|
| Агродерново-подзолистая почва (залежь) | | | | |
| P (0-18 см) | 32,51 | Суглинок средний | 1,21 | 2,52 |
| EL (36-42 см) | 28,17 | | 0,72 | 2,46 |
| ELB (42-51 см) | 30,39 | | 0,54 | 2,54 |
| BT1(50-80 см) | 33,10 | | 0,24 | 2,52 |
| BT2 (80-95 см) | 40,59 | | 0,1 | 2,54 |
| Дерново-подзолистая (лес) | | | | |
| AУ (4-15 см) | 42,73 | Суглинок тяжелый | 4,31 | 2,34 |
| EL (15-28 см) | 34,28 | | 1,63 | 2,52 |
| ELB (28-35 см) | 42,57 | | 0,36 | 2,51 |
| BT1 (35-70 см) | 46,05 | | 0,24 | 2,46 |
| Агрочернозем типичный (пашня) | | | | |
| PU1 (0-10 см) | 54,72 | Суглинок тяжелый | 3,21 | 2,47 |
| PU2 (15-25 см) | 63,34 | | 2,77 | 2,45 |
| PU3 (12-35 см) | 53,46 | | 1,82 | 2,45 |
| AU (40-50 см) | 49,15 | | 1,68 | 2,53 |
| AB (70-90 см) | 44,37 | | 1,21 | 2,48 |
| Чернозем типичный (лесополоса) | | | | |
| AU1 (0-12 см) | 50,68 | Суглинок тяжелый | 4 | 2,43 |
| AU2 (12-35 см) | 60,03 | | 3,47 | 2,52 |
| AU (35-65 см) | 43,81 | | 3,18 | 2,6 |
| BCAv1 (65-110 см) | 59,02 | | 1,89 | 2,56 |
| Агрочернозем слитой (пашня) | | | | |
| PU1, PU2 (0-20 см) | 66,43 | Глина лёгкая | 3,2 | 2,54 |
| PU2 (20-40 см) | 68,67 | | 2,78 | 2,57 |
| Auv (40-60 см) | 62,65 | | 1,81 | 2,65 |
| BCAv (60-80 см) | 66,68 | | 1,67 | 2,6 |
| Агрочернозем слитой (залежь) | | | | |
| AU1, AU2 (0-20 см) | 64,70 | Глина лёгкая | 4 | 2,52 |
| Auv (20-40 см) | 64,64 | | 3,45 | 2,52 |
| BCAv1 (40-60 см) | 65,96 | | 3,17 | 2,55 |
| BCAv2 (60-80 см) | 65,40 | | 1,89 | 2,59 |

При изучении реологических параметров (таблица 2) выявлено, что «предел Шведова», соответствующий началу деформационных процессов, и начальная вязкость меньше у почвенных образцов, не находящихся в аграрном пользовании. В черноземе типичном и



слитом выделяются несколько пределов прочности, соответствующих ступенчатому разрушению структуры и падению эффективной вязкости. Отношение $P_{\kappa 1}/P_{\kappa 2}$, выражающее наличие дилатантных свойств, минимально в черноземах. Предел пластично-вязкого разрушения структуры (P_m) для агрочерноземов слитых в таблице не указан, так как значения вышли за рамки возможного определения на приборе. Это означает, что для разрушения структурных связей нужно приложить нагрузку больше.

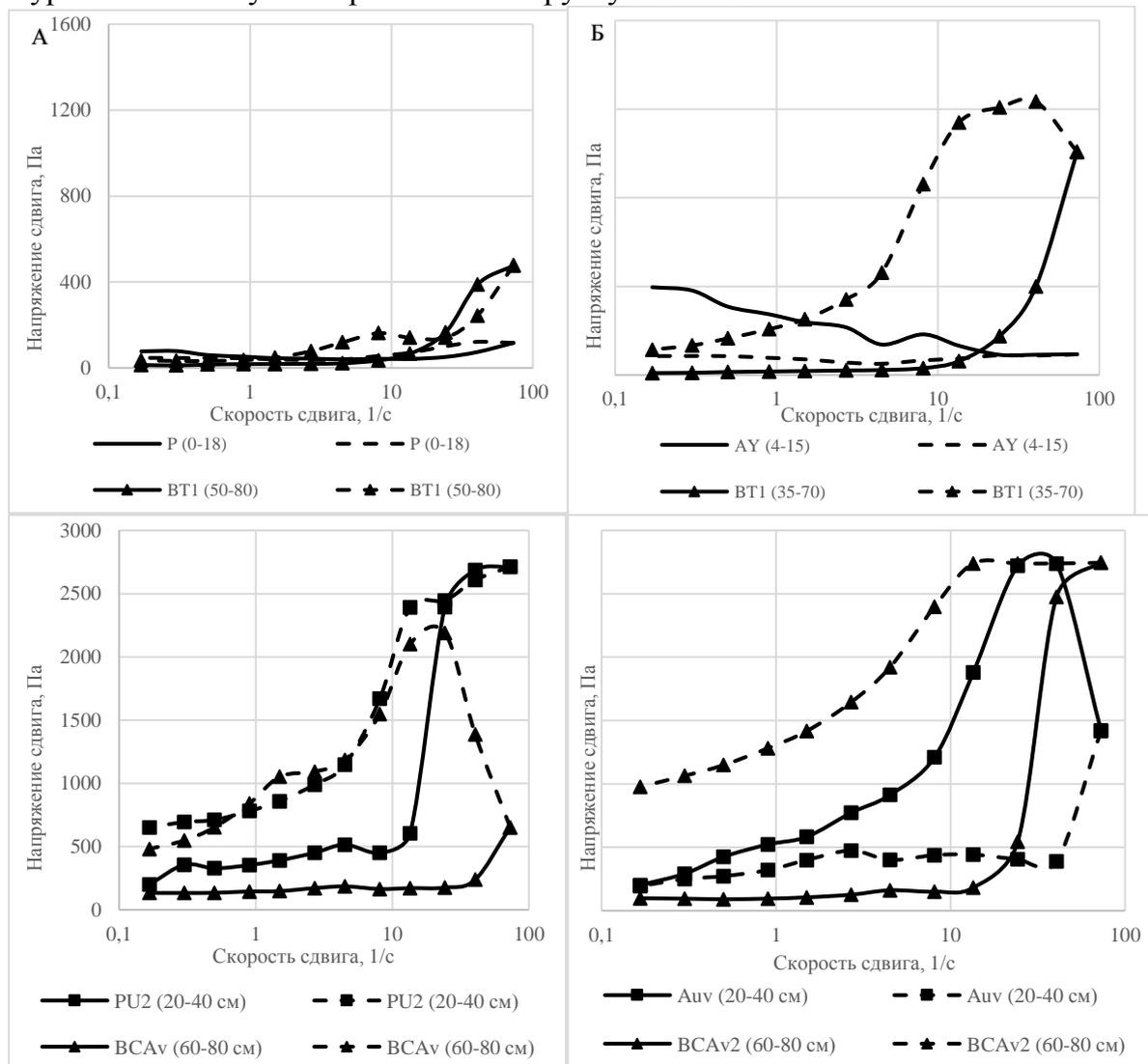


Рис. 1. Зависимость напряжения сдвига (τ , Па) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$, с^{-1}): А – агродерново-подзолистая почва (залежь); Б – дерново-подзолистая почва (лес); В – агрочернозем слитый (пашня); Г – агрочернозем слитый (залежь). Прямой ход изображен сплошной линией, обратный – пунктирной



Таблица 2. Реологические параметры исследуемых почв

| Горизонт, глубина/мощность, см | R _{k1} | R _{k2} | R _m | R _{кон} | η _{Rk1} | η _{кон} | η _{кон/ηнач} |
|--|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Агродерново-подзолистая почва (залежь) | | | | | | | |
| P (0-18 см) | 77,4 | 35; 32,5 | 51,3 | 47,0 | 455,0 | 276,4 | 0,6 |
| ELB (42-51 см) | 14,7 | 15 | 20,0 | 39,2 | 86,7 | 230,7 | 2,7 |
| BT2 (80-95 см) | 13,8 | 17 | 21,4 | 34,9 | 80,9 | 205,2 | 2,5 |
| Дерново-подзолистая почва (лес) | | | | | | | |
| AУ (4-15 см) | 396 | 60 | 87,6 | 85,5 | 2329,5 | 502,9 | 0,2 |
| BT1 (35-70 см) | 8,8 | 18 | 62,2 | 114,7 | 51,6 | 674,5 | 13,1 |
| Агрочернозем типичный (пашня) | | | | | | | |
| PU1 (0-10 см) | 188,7 | 316,5; 180,5; 7,5 | 119,9 | 35,5 | 1132,1 | 212,8 | 0,2 |
| AU (40-50 см) | 186,1 | 295,6; 150 | 89,2 | 36,8 | 1116,6 | 220,8 | 0,2 |
| AB (70-90 см) | 37 | 22,5; 27,6; 20,4 | 97,9 | 22,8 | 221,7 | 136,6 | 0,6 |
| Чернозем типичный (лесополоса) | | | | | | | |
| AU1 (0-12 см) | 196,1 | 49,3; 244,3 | 179,2 | 86,8 | 1176,4 | 520,7 | 0,4 |
| BCAv1 (65-110 см) | 130,4 | 75,1 | 90,1 | 32,1 | 782,1 | 192,5 | 0,2 |
| Агрочернозем слитой (пашня) | | | | | | | |
| PU1, PU2 (0-20 см) | 200,3 | 398,4; 300; 655,1(278,6) | - | 652,1 | 1201,3 | 3911,9 | 3,3 |
| PU2 (20-40 см) | 425,5 | 481,6; 353,2; 453,4 (2402) | - | 847,5 | 2552,4 | 5083,8 | 2,0 |
| BCAv (60-80 см) | 162 | 230,4; 148,4; 477,4 | - | 654,9 | 971,6 | 3928,8 | 4,0 |
| Агрочернозем слитой (залежь >5 лет) | | | | | | | |
| AU1, AU2 (0-20 см) | 202,3 | 628,4; 398,5; 128,3 | - | 194,3 | 1213,3 | 1165,8 | 1,0 |
| Auv (20-40 см) | 193,5 | 521,5; 2701,4 | - | 1529,4 | 1160,9 | 9174,3 | 7,9 |
| BCAv2 (60-80 см) | 205 | 409,9; 2500 | - | 911,1 | 1229,7 | 5465,7 | 4,4 |

Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы: 1) прочностные свойства более выражены у почв, не подверженных антропогенному воздействию; 2) наиболее прочной структурой обладают почвы с повышенным содержанием тонкодисперсной фракции; 3) среди пахотных почв самая высокая способность к восстановлению почвенной структуры наблюдается у чернозема слитого, из рассмотренных - у чернозема слитого, находящегося в залеже.

Литература

1. Ерёмин Д. И. Агрогенное изменение гранулометрического состава при распашке чернозема выщелоченного в лесостепной зоне Зауралья // Вестник КрасГАУ, 2014. №8. С. 34-36.



2. Замотаев И. В. и др. Агрогенная и постагрогенная трансформация почв Льговского района Курской области //Бюллетень Почвенного института им. ВВ Докучаева. – 2016. – №. 85.
3. Шейн Е. В. Курс физики почв // М.: Изд-во МГУ, 2005. 432с.
4. Шейн Е. В. и др. Теории и методы физики почв // М.: Гриф и К, 2007.
5. Ghezzehei T. A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses //Soil Science Society of America Journal. – 2001. – Т. 65. – №. 3. – С. 624-637.
6. Holthusen D. et al. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping //Soil and Tillage Research. – 2018. – Т. 177. – С. 113-124.
7. Mashiri M. S. et al. Shear strength and dilatancy behavior of sand–type chip mixtures //Soils and Foundations. – 2015. – Т. 55. – №. 3. – С. 517-528.
8. Onoda G.Y., Liniger E.G. Random loose packings of uniform spheres and the dilatancy onset //Physical review letters. – 1990. – Т. 64. - № 22. – С. 2727.
9. Zhang X. W. et al. Thixotropic mechanism of clay: A microstructural investigation //Soils and Foundations. – 2017. – Т. 57. – №. 1. – С. 23-35.



УДК631.4

СМАЧИВАЕМОСТЬ РЕЧНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Кошельков А.М.¹, Тюгай З.², Крутикова В.О.^{3,4}, Харитонов Г.В.⁴

¹Институт Горного Дела ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация
ecolog.dv@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
zemfira53@yandex.ru

³Институт Тектоники и Геофизики ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация
nm32697@gmail.com

⁴Институт Водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация,
gkharitonova@mail.ru

WETTABILITY OF RIVER BOTTOM SEDIMENTS POLLUTED BY PETROLEUM PRODUCTS

Koshelkov A.M.¹, Tjugaj Z.², Krutikova V.O.^{3,4}, Kharitonova G.V.⁴

¹Institute of Mining, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

²Soil Department of Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

Institute of Water and Ecological Problems, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

Annotation: The impact of oil pollution (from 1000 up to 18000 mg/kg) on wettability of river bottom sediments was analyzed. The contact angle of wetting of the solid phase was determined by the method of static drop. It is shown that the contact angle of wetting can be used to assess the degree of contamination of the bottom sediments.

Введение

Загрязнение окружающей среды нефтью и нефтепродуктами является одной из самых острых экологических проблем не только в районах добычи и транспорта нефти, но и ее переработки. Это требует совершенствования методов оценки содержания нефти и нефтепродуктов и степени загрязнения ими отдельных компонентов экосистем: почв, поверхностных и подземных вод и речных донных отложений (ДО) в том числе. ДО являются конечным этапом миграции всех загрязняющих веществ, поступающих с прилегающей суши и из атмосферы, и могут служить интегральными показателями загрязнения территории нефтью и нефтепродуктами. Их концентрация в ДО, поровых водах и придонном слое воды намного выше, чем в водной толще.

Поверхность твердой фазы ДО оказывает большое влияние на сорбцию/десорбцию, транспорт и пространственное распределение нефтепродуктов (Абдалла и др., 2007), и доступность растворенных веществ для функционирования микробиоты. Отметим, что биохимические процессы самоочищения в ДО происходят крайне медленно. Множество происходящих в ДО процессов зависит от смачиваемости твердой фазы водой, численно характеризуемой краевым углом смачивания (КУС).

Основным фактором формирования гидрофобно-гидрофильных свойств отложений является органическое вещество (Милановский, 2009, Tugai, Milanovskiy, 2014). Органическое вещество гумусовой природы, поступающее с территории водосбора, имеет амфифильный характер (присутствие в молекулах гидрофильных групп и гидрофобных зон) и влияет на степень смачиваемости отложений. В свою очередь нефть и нефтепродукты при превышении некоторой концентрации приводят к изменению характера смачиваемости



(смена гидрофильности на гидрофобность). При этом краевой угол смачивания становится больше 90° , и образец теряет способность впитывать и удерживать влагу. Последнее обстоятельство позволяет предполагать, что величина краевого угла смачивания может характеризовать уровень загрязнения и содержание нефти и нефтепродуктов в отложениях, проследить динамику их трансформации во времени.

Цель работы – оценить изменение степени и характера смачиваемости (по величине краевых углов смачивания) речных донных отложений при разной степени загрязнении их нефтепродуктами.

Объекты и методы

Исследования проводились в Кировском административном районе г. Хабаровск. Участок располагается в периодически затапливаемой береговой зоне р. Амур, в месте впадения малой реки – ручей Курча-Мурча. Поверхность спланирована насыпными грунтами. Мощность насыпных грунтов составляет 3,4-3,6 м, представленных до глубины 1,9-2,2 м гравийными грунтами с песчаным и супесчаным заполнителем. Растительность на рассматриваемом участке полностью отсутствует, причиной чего являются частые и продолжительные затопления во время высоких уровней воды в р. Амур, а также искусственная отсыпка крупнообломочным материалом. Малая река Курча-Мурча берёт начало в оврагах частного сектора в северо-восточной части Кировского района и впадает в р. Амур у нефтеналивного причала. Длина водотока – 2,5 км, площадь водосбора – 2,7 км². Практически вся приустьевая часть руч. Курча-Мурча заключена в подземный коллектор, в который собираются все сточные воды с его водосбора. На территории водосбора ручья Курча-Мурча располагаются крупные промышленные предприятия: «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод» (с нефтешламовым отстойником), «ННК-Хабаровскнефтепродукт» (оба с подземными резервуарами для хранения нефтепродуктов), грузовой речной порт и др.

Отбор проб ДО был проведен в период речной межени с 25 мая по 13 июня 2018 г. Для характеристики территории были отобраны и почвогрунты (**Рис. 1**). Их общая характеристика физико-химических свойств и содержание нефтепродуктов были определены нами ранее (Гаретова и др., 2018).

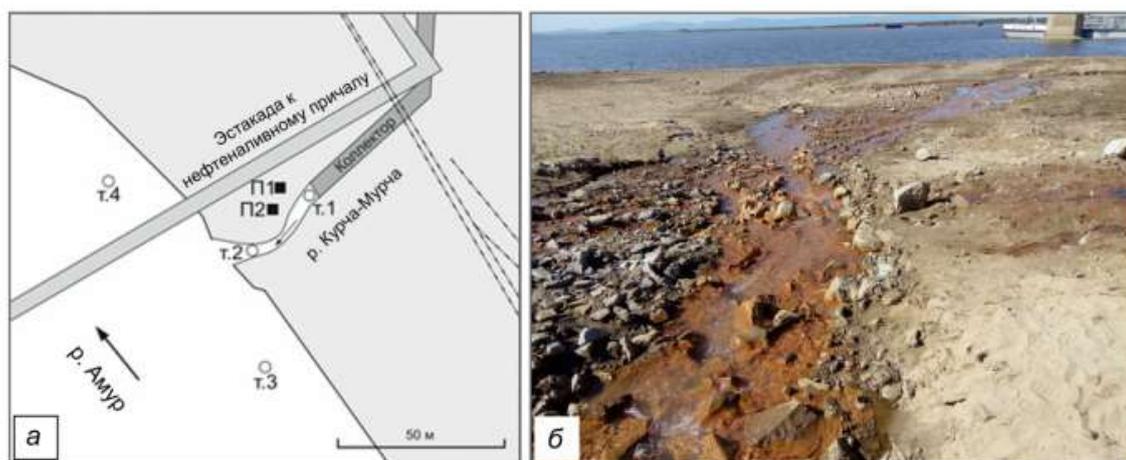


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора образцов (а) и общий вид (б) района исследования.
Точки 1–4 и П1, П2 – места отбора донных отложений и почвогрунтов

Измерение угла смачивания проводили методом статической капли с помощью системы анализа формы капли DSA 100 (KRÜSS, GmbH, Германия). Система DSA 100 состоит из трех



блоков: столик для образца с тремя мобильными осями, видеокамера и дозирующая система, которая контролируется специальной программой. Прибор позволяет измерять КУС методом статической, так и динамической капли. В методе статической капли с помощью специальной иглы капля определенного объема приводится в соприкосновение с измеряемой поверхностью. Затем игла поднимается, а капля остается на поверхности образца. Весь процесс регистрируется видеокамерой в режиме макросъемки. С помощью программного обеспечения анализируется форма капли и рассчитывается КУС между каплей и поверхностью, на которую она посажена. Объем капли дистиллированной деаэрированной воды 1.5 мкл, скорость ее вытекания 75-100 мкл/мин. Величины КУС зависят от метода подготовки образца к анализу. Поэтому остановимся на методе подготовки подробнее. Исследуемый образец отделялся от растительных остатков и камней, просеивался через сито <0,5 мм. Просеянные образцы помещались на 24 часа в сушильный шкаф при температуре 45-50°C. На предметные стекла наклеивались кусочки двусторонней клейкой ленты (размером 0,5x0,5 см). На клейкий слой ленты наносился ровным слоем подготовленный образец и аккуратно придавливался другим предметным стеклом с грузом 300 мг в течение 1 минуты. Не приклеившиеся частицы образца аккуратно стряхивались. Для получения максимально ровного слоя процедуру повторяли несколько раз.

Основной метод исследования был дополнен анализом гранулометрического и валового состава и анализом образцов методами растровой электронной микроскопии (РЭМ анализ). Для получения сравнимых данных, как и в случае определения КУС, анализу подвергалась фракция <0,5 мм. Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции (распределение по объему) на анализаторе размера частиц (Mastersizer 3000, Великобритания). Валовой состав воздушно-сухих образцов определяли рентген-флуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Германия) по силикатной методике. РЭМ анализ был проведен с использованием VEGA 3 LMN (TESCAN, Чешская республика). Образцы были подготовлены методом просыпки, напыление – Pt, увеличение – до 20000x. Для анализа элементного состава наиболее репрезентативных участков использовали энергодисперсионный спектрометр X-max 80 (Oxford Instruments, Великобритания).

Результаты и обсуждение

Адсорбция нефти и нефтепродуктов зависит от гранулометрического и химического составов отложений. Поскольку территория участка в геоморфологическом отношении приурочена к руслу реки Амур, подтопляется в период паводков в реке и довольно продолжительное время находится под водой, ДО руч. Курча-Мурча, р. Амур и почвогрунтов исследуемого участка характеризуются близким валовым составом (Табл. 1).

Таблица 1. Валовой состав отложений, фракция <0.5 мм, %

| Объект | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | S |
|--------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|
| т. 1 | 78.32 | 0.32 | 9.95 | 5.53 | 0.10 | 1.45 | 0.75 | 2.48 | 2.67 | 0.33 | 0.15 |
| т. 2 | 89.17 | 0.26 | 10.14 | 3.65 | 0.06 | 0.88 | 0.56 | 2.36 | 2.91 | 0.08 | 0.05 |
| т. 3 | 85.04 | 0.39 | 11.84 | 3.04 | 0.06 | 0.99 | 0.66 | 2.94 | 3.03 | 0.08 | 0.02 |
| т. 4 | 84.19 | 0.32 | 11.41 | 3.71 | 0.07 | 1.30 | 0.92 | 2.82 | 3.17 | 0.09 | 0.03 |
| П1 | 87.73 | 0.24 | 10.03 | 3.71 | 0.08 | 1.06 | 0.54 | 2.37 | 2.90 | 0.10 | 0.11 |
| П2 | 90.77 | 0.23 | 10.07 | 3.11 | 0.07 | 0.97 | 0.49 | 2.34 | 2.92 | 0.08 | 0.08 |

По этой же причине и гранулометрический состав мелкозема отложений близок: основная фракция – средний песок – составляет 46–49% (Табл. 2). Исключение составляют тт. 1 и 3, что связано с гидрологическими особенностями местоположения этих точек.



Таблица 2. Гранулометрический состав отложений, фракция <0.5 мм, %

| Объект | Размер фракции, мкм | | | | | | |
|--------|---------------------|-------|------|-------|--------|---------|----------|
| | <1 | 1–5 | 5–10 | 10–50 | 50–250 | 250–500 | 500–1000 |
| т. 1 | 2.10 | 10.61 | 7.93 | 21.32 | 20.67 | 20.67 | 10.70 |
| т. 2 | 0.75 | 4.38 | 2.82 | 6.32 | 20.69 | 47.31 | 17.72 |
| т. 3 | 1.80 | 8.57 | 4.66 | 11.64 | 38.21 | 30.24 | 4.88 |
| т. 4 | 0.66 | 3.94 | 2.43 | 6.51 | 30.00 | 43.27 | 13.20 |
| П1 | 1.26 | 6.55 | 3.80 | 9.36 | 19.11 | 45.53 | 10.30 |
| П2 | 0.85 | 4.31 | 2.48 | 5.90 | 27.79 | 48.51 | 10.16 |

Анализ краевых углов смачивания показал, что нефть и нефтепродукты при превышении концентрации в 1000 мг/кг приводят к изменению характера смачиваемости ДО и грунтов: краевой угол смачивания становится много больше 90°. Происходит существенное изменение качества поверхности твердой фазы: из гидрофильной она превращается гидрофобную (смена гидрофильности на гидрофобность). При рассматриваемых содержаниях нефтепродуктов 2100–17600 мг/кг угол смачивания практически не меняется, оставаясь в пределах 116–130° (Табл. 3). Заметим, что точность определения угла смачивания данным методом составляет 5°. Гидрофильными (угол смачивания 63°) остаются ДО с загрязнением в 1180 мг/кг. Эта величина с точностью до анализа совпадает с рекомендуемым допустимым уровнем содержания нефтепродуктов для почв и грунтов суши. В соответствии с документом «Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами» (утвержденным Роскомземом 10 ноября 1993 г. и Минприроды РФ 18 ноября 1993) она составляет 1000 мг/кг. В настоящее время в Российской Федерации не существует нормативного документа, определяющего ПДК загрязняющих веществ в донных отложениях. По классификации Пиковского (1993), содержание нефтепродуктов в почве до 100 мг/кг соответствует «фоновой» концентрации, 100–500 мг/кг – «повышено фоновой», 500–1000 мг/кг – «умеренный уровень» загрязнения, 1000–2000 мг/кг – «умеренно опасное», 2000–5000 мг/кг – «сильное» и более 5000 мг/кг – «опасное» загрязнение. Согласно полученным данным, с большой долей уверенности можно утверждать, что для ДО допустимым уровнем содержания нефтепродуктов является, как и для почв и грунтов, величина в 1000 мг/кг.

Таблица 3. Физико-химические свойства отложений

| Объект | НП (мг/кг) | Степень загрязнения (Пиковский, 1993) | КУС (градус) |
|--------|---------------|--|-----------------|
| т. 1 | 17640 | опасное | 130 |
| т. 2 | 7590 | опасное | 121 |
| т. 3 | 1180 | умеренный уровень | 63 |
| т. 4 | 3560 | сильное | 115 |
| П1 | 4560 | сильное | 128 |
| П2 | 2120 | сильное | 116 |

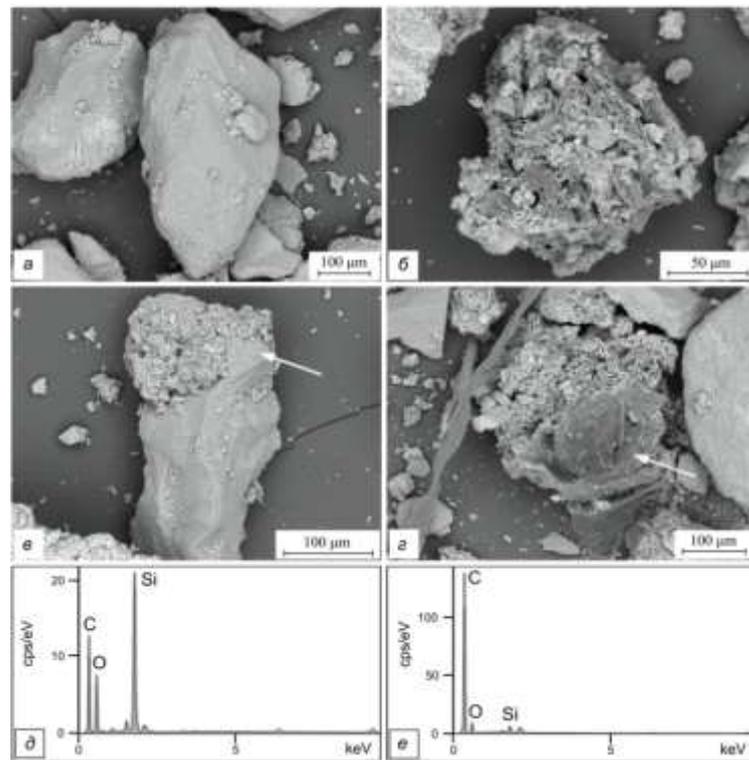


Рис. 2. Микрофотографии ДО: *а, б* – т. 3, р. Амур; *в, з* – т. 1, руч. Курча-Мурча (РЭМ, BSE-детектор); *д, е* – ЭДС-анализ точек, выделенных стрелками

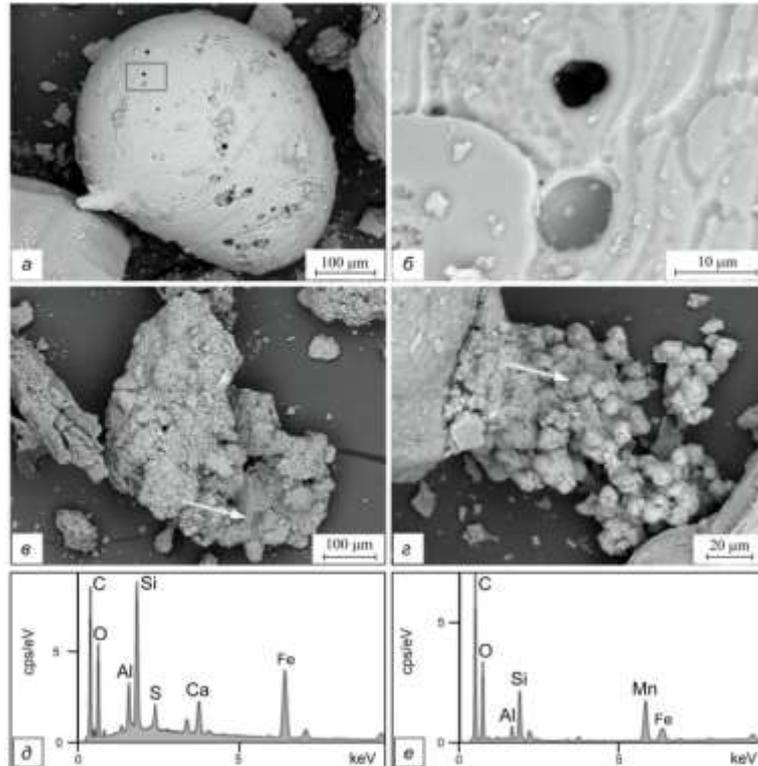


Рис. 3. Микрофотографии ДО руч. Курча-Мурча, т. 1 (*а – з*) и ЭДС-анализ точек, выделенных стрелками (*д, е*).



Как свидетельствуют данные РЭМ, при данной концентрации еще не фиксируются пленки нефтепродуктов на зернах первичных минералов (**Рис. 2**) и заполнение пор нефтепродуктами (**Рис. 3а, б**), как при высоких уровнях загрязнения. Кроме того, как в почвах (Шамраев, Шорина, 2009), при высоких уровнях загрязнения в ДО диагностируется концентрирование соединений Fe и Mn на поверхности нефтяных пленок. При этом образуются железистые микроагрегаты и Fe-Mn конкреции с высоким содержанием углерода, до 70 ат. % (**Рис. 3в–е**). Именно поэтому т. 1 отличается повышенным содержанием Fe₂O₃ и MnO.

Выводы

Краевой угол смачивания донных отложений зависит от степени загрязнения их нефтью и нефтепродуктами. Для донных отложений допустимым уровнем содержания нефтепродуктов является, как и для почв и грунтов величина в 1000 мг/кг. Поверхность отложений остается гидрофильной: краевой угол смачивания 63°. При сильной и опасной по Пиковскому степени загрязнения происходит существенная гидрофобизация поверхности: краевой угол смачивания возрастает до 110–120° и более.

Литература

- Абдалла В., Бакли Д.С., Карнеги Э. и др. (2007) Основы смачивания. *Нефтегазовое обозрение. Schlumberger* **19(2)**, 54–75.
- Гаретова Л.А., Фишер Н.К., Имранова Е.Л., Кириенко О.А., Кошельков А.М., Тюгай З. (2018) Оценка углеводородного загрязнения территории промзоны г. Хабаровска (вода, почвогрунты, донные отложения). *Региональные проблемы*. **21(4)**, 44–51
- Милановский Е.Ю. (2009) Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 186 с.
- Пиковский Ю.И. (1993). Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: МГУ, 208 с.
- Шамраев А.В., Шорина Т.С. (2009). Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды. *Вестник ОГУ* **6**, 642–645.
- Tugai Z., Milanovskiy E. (2014). The contact angle of wetting of the solid phase of soil before and after chemical modification // Abstract book 9th International Soil Science Congress on “The Soul of Soil and Civilization” (14-16 October 2014). Side, Antalea/Turkey, p. 144.



УДК 631.4

ГИСТЕРЕЗИС ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ: ВЗАИМОСВЯЗЬ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ

Мигдисова И.А.¹, Абросимов К.Н.², Шеин Е.В.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Москва
ira-mig@yandex.ru

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва
kv2@bk.ru

Annatation. Hysteresis in the soil water retention curve: the correlation between tomographic indicators and physical properties of soils.

Грамотное использование и интерпретация гистерезиса ОГХ позволяет экономить достаточно большие объемы поливной воды при производственных поливах по тензиометрам. Это происходит вследствие того, что одному значению капиллярно-сорбционного давления может соответствовать два значения влажности (при циклах иссушения и увлажнения). Основной причиной возникновения явления гистерезиса является неравномерность строения почвенных капилляров, а также влияние процессов усадки и набухания в указанных циклах. Томографические исследования позволяют количественно учесть изменение порового пространства почв и изменения его структуры при воздействии процессов иссушения/увлажнения, таким образом появляется возможность объяснить существующий гистерезис ОГХ.

Томографические показатели (открытая, закрытая пористость, число контактов пор и др.) в циклах увлажнения и иссушения связаны с гистерезисной петлей ОГХ, а также с классическими физическими свойствами (общая пористость, водоустойчивость и др.). Основная цель исследования: определить указанные взаимосвязи томографических показателей с традиционными физическими свойствами. Для этого были поставлены следующие задачи: (1) произвести серию томографических съемок ненарушенных образцов при различных влажностях, соответствующих значениям определенного капиллярно-сорбционного давления с учетом гистерезиса ОГХ; (2) сравнить полученные значения пористости почв, визуально оценить различие морфологического строения порового пространства и (3) попытаться провести корреляцию между параметрами, полученными при томографическом исследовании и заданными значениями капиллярно-сорбционного давления в почве.

Основным объектом исследования послужили образцы дерново-подзолистой почвы, отобранные в июне 2018 года на опытном поле в селе Ельдигино. Для проведения опыта были подготовлены 8 микромонолитов почвы ненарушенной структуры из разных горизонтов почвенного профиля (глубины 5-10, 15-20, 25-30 и 40-45 см), упакованных в шприцы (d=2 см). Для проведения съемки внутренней структуры микромонолитов почвы использовался рентгеновский микротомограф SkyScan 1172G. Микротомографическое исследование включало три последовательных этапа: (1) пробоподготовка, (2) съёмка с разрешением 10 мкм и реконструкция, (3) обработка результатов.

В ходе исследования было установлено, что такие показатели, как количество закрытых и открытых пор, а также их объемная доля и связность, образуют гистерезис – то есть при



одном значении капиллярно-сорбционного давления значения полученных параметров могут сильно варьировать.

С развитием современных методов определения почвенных свойств в почвоведении открылось множество новых возможностей – при томографическом исследовании структуры порового пространства почв стали доступны ранее не изученные характеристики, такие как открытая, закрытая пористость и связанность пор. Эти сведения способствуют более детальному изучению происходящих в почве процессов, что в будущем позволит нам использовать земельные ресурсы более рационально. Что, несомненно, приведет к улучшению качества почв в России в частности и в мире в целом.



УДК 631.48

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА СВОЙСТВА ПОЧВ

Михайловская Т.О.¹, Шваров А.П.¹, Федотов Г.Н.¹, Бычков В.Л.², Черников В.А.², Дешко К.И.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
Mih.tamara.oleg@gmail.com

²Физический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация
Bychvl@gmail.com

Annotation: The effect of atmospheric electricity phenomena of different nature on soil properties has been studied. The impact of the corona discharge in changing of the electrical conductivity, acidity and allelotoxicity of sod-podzolic soil has been revealed. Changes of the electrical conductivity, dispersed state and surface properties of chernozem eingexposed to influence of the natural ball lightning have been estimated.

Введение

Изучение явлений, связанных с электричеством атмосферы актуально не только с теоретической точки зрения, но и в прикладном аспекте – для оценки биосферных и экологических функций планеты [1]. Среди составных частей электричества атмосферы можно выделить ионные потоки к поверхности Земли в ясную и особенно в грозовую погоду, линейные и шаровые молнии, а также плазмоиды – малоизученные структуры атмосферного электричества

Несомненный интерес представляет воздействие коронных разрядов на почвенный покров и растительность, поскольку разряды такого типа часто реализуются в природных условиях. Моделирование природной обстановки и исследование влияния коронных разрядов на различные объекты можно проводить в лабораторных условиях при использовании стандартной аппаратуры [2].

Целью настоящей работы было изучение влияния коронного разряда и шаровой молнии (ШМ) на некоторые свойства почв и их агроэкологическое состояние.

Объекты и методы

Объектом исследования в модельных условиях послужила пахотный горизонт дерново-подзолистой почвы. По гранулометрическому составу он соответствует средней глине. Содержание частиц менее 0,01 мм составляет 68%. Содержание углерода 1,65%, рН водной вытяжки 6,40. Для оценки возможного воздействия природной ШМ на свойства почв был использован чернозем слитой предкавказкий, отобранный из эпицентра контакта молнии с почвенным покровом. Факт воздействия природной ШМ на почвенный покров, в Гиагинском районе республики Адыгея был зафиксирован в протоколе секретарем комитета по проблемам ШМ РАЕН Долгоруким А.М. Им же был произведен первичный анализ обстановки эпицентра влияния ШМ и отобран монолит чернозема для лабораторных исследований. Среди общих свойств чернозема можно отметить, содержание физической глины 72%, содержание углерода 2,78%, рН водной вытяжки 6,60.

В лабораторных условиях было исследовано влияние коронного разряда на свойства почв. На рисунке представлена схема экспериментального устройства (рис.1). Установка состоит из кюветы с почвенными образцами различной влажности и электрической цепи. Специально разработанный для данных экспериментов верхний электрод представлял собой



систему игл (29 шт), полностью покрывающих кювету с образцами. Расстояние между иглами электродной системы и поверхностью образцов составляло 11 мм.

В зависимости от условий экспериментов электроды находились под положительным или отрицательным потенциалом. При этом были измерены вольт-амперные характеристики разряда над поверхностью почвы.

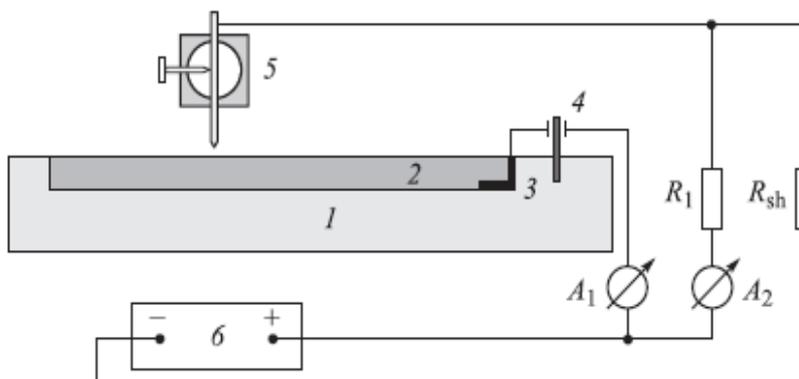


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки 1 – кювета, 2 – почва (зерно), 3 – анод, 4 – подставка, 5 – катод, 6 – источник питания

Электропроводность почв определяли в состоянии пасты 4-х электродным методом. Гранулометрический состав почвы определяли дифрактометрически на лазерном дифрактометре, рН водной вытяжки по стандартной методике. Содержание прочносвязанной влаги определяли методом сорбционного равновесия. Содержание аллелотоксинов, находящихся в активной форме определяли методом биотестирования [4].

Результаты и обсуждение

Одним из основных вопросов при оценке влияния электричества атмосферы на почвенный покров является изменение электропроводности почв. Компоненты плазмы при коронном разряде взаимодействуют с почвенной матрицей и поровым раствором и могут, в конечном итоге, изменять электрическую проводимость системы. В естественных условиях влагосодержание почвы может варьироваться в очень широких пределах. Поэтому первой задачей в наших исследованиях было выяснение влияния коронного разряда на электропроводность почвы в условиях разного увлажнения. Установлено, что увеличение влажности почвы при ее обработке коронным разрядом под отрицательным потенциалом приводит к снижению электрической проводимости (табл.1).

Величина электрической энергии, поступающей на поверхность почвы рассчитывалась по формуле:

$$\sigma = U(\text{Вольт}) \times I(\text{мкА}) \times T(\text{сек})$$

Типичные значения напряжения и силы тока составляли $U=8-10$ кВ и $I=240-260$ мкА. Время воздействия варьировалось от 1 до 10 минут. При сравнимо близкой вложенной энергии (428-484 Дж) электропроводность почвы снижалась от 3110 при влажности почвы 4,2% до 2020 мкСм при влажности 30,0% (Табл. 1). Аналогичная зависимость наблюдается и для более высокого уровня вложенной энергии – 1200-1500 Дж. При этом обращает на себя внимание то, что увеличение энергии при одной и той же влажности снижает проводимость почвенных паст.



Рост времени воздействия на почву коронного разряда и, соответственно, озона, создаваемого плазмой разряда, должен приводить к усилению окисления гуминовых веществ (ГВ). Аналогичная ситуация наблюдается при повышении влажности почв из-за большей окислительной способности озона, растворенного в воде. Таким образом, количество окисленных участков частиц ГВ и, соответственно, электропроводности почвенных паст при увеличении времени обработки коронным разрядом, энергии воздействия и влажности почв должна расти, а наблюдается обратная картина.

Таблица 1 Влияние влажности и подведённой энергии на электропроводность дерново-подзолистой почвы

| Влажность, % | Энергия, Дж | ЕС, МкСм |
|--------------|-------------|----------|
| 4,2 | 480 | 3110 |
| 14,9 | 428 | 2150 |
| 30,0 | 484 | 2020 |
| 4,2 | 1217 | 2364 |
| 14,9 | 1334 | 1849 |
| 30,0 | 1482 | 1650 |

По нашему мнению, в основе этого феномена лежит следующий механизм. Количество ионов в почвенном растворе паст определяется степенью контакта частиц гуминовых веществ (ГВ) через гидрофильные участки, так как в этих областях происходит закрепление ионов. Происходящий в почвах при иссушении структурный переход [5] приводит к образованию структур, в которых гидрофильные участки замыкаются друг на друга, удерживая почвенный раствор, обогащенный ионами.

Движущей силой процесса структурного перехода при увлажнении почвы является снижение трансляционной энтропии молекул воды, обусловленное увеличением площади контакта гидрофобных участков частиц ГВ с водой. Окисление части гидрофобных участков ГВ при обработке почвы коронным разрядом приводит к их гидрофилизации, уменьшает движущую силу перестройки структуры и снижает выход ионов из внутренних областей гумусовой матрицы в почвенный раствор. Как следствие, электропроводность снижается.

Несомненный интерес представляет влияние электрических процессов на важнейший почвенный показатель – кислотность почв. Было установлено, слабое подщелачивание почв с увеличением рН от 6,4 на контроле до 6,8 при обработке коронным разрядом, что тоже можно объяснить только с позиций структурного перехода в гумусовой матрице почв.

Была произведена оценка влияния обработки почв коронным разрядом на изменение содержания аллелотоксинов в почвах в активном состоянии. Было установлено, что обработка дерново-подзолистой почвы коронным разрядом статистически достоверно увеличивает содержание аллелотоксинов на 10-15%. Связано это, по-видимому, с тем, что аллелотоксины в силу своей химической природы закрепляются, в основном, на гидрофобных участках ГВ. Повышение гидрофильности этих участков при окислении коронным разрядом приводит к замедлению структурного перехода и большему их растворению в почвенном растворе, что усиливает их негативное влияние на растения.

В качестве анализа влияния на почву атмосферного электричества другого типа изучено действие ШМ. При исследовании влияния на почву ШМ было установлено, что при ее возможным контакте с поверхностью почвы, в ней образовалась скважина правильной цилиндрической формы диаметром 84 мм и глубиной 220 мм. В эпицентре предполагаемого контакта ШМ с поверхностью поля электропроводность чернозема слитого более чем в два раза (250%) превышала электропроводность чернозема из окружающего ландшафта. Это



позволяет предположить наличие на поверхности ШМ ионов, образованных в плазме, отличающейся по составу от плазмы коронного разряда.

При воздействии ШМ также наблюдалось небольшое подщелачивание почвы. В эпицентре рН составила 6,74, а на контроле 6,59, что коррелирует с данными, полученными при изучении воздействия на почву коронного разряда. Также в эпицентре по сравнению с контролем возрастает содержание аллелотоксинов в активном состоянии. (на 10-15%)

Нами сделана попытка выяснить влияние электрических процессов разного типа на дисперсное состояние почв. Содержание фракций различного размера образцов контроля и обработанных отрицательной короной при различной влажности и различной по мощности энергии было статистически одинаково. В случае с ШМ результат был иной. Содержание наиболее тонких фракций в эпицентре предполагаемого контакта было значительно выше контрольных (табл.2).

Таблица 2 Гранулометрический состав чернозема слитого выщелоченного, %

| Вариант | Фракции гранулометрических элементов, мм | | | | | | | |
|----------|--|-------------|------------|-----------|-----------|----------|---------|--------|
| | <0,001 | 0,001-0,005 | 0,005-0,01 | 0,01-0,05 | 0,05-0,25 | 0,25-0,5 | 0,5-1,0 | <0,005 |
| Эпицентр | 14,20 | 48,62 | 13,90 | 21,32 | 1,79 | 0,16 | 0 | 62,82 |
| Контроль | 11,60 | 45,13 | 15,13 | 24,38 | 3,68 | 0,07 | 0 | 56,73 |

Факт диспергации почвенной матрицы в эпицентре воздействия природной ШМ был подтвержден анализом сорбционной способности почв. Было установлено, что в эпицентре у образцов чернозема наблюдалась более высокая влагосодержание, во всем диапазоне относительных давлений паров воды (рис.2).

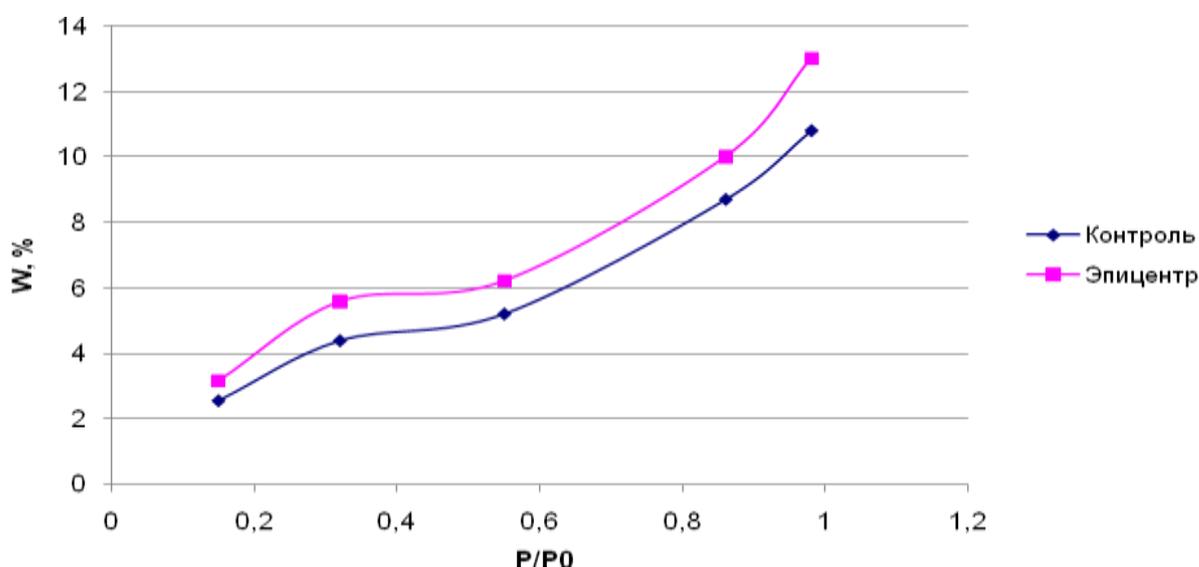


Рис 2. Изотермы сорбции паров воды контрольного образца и образца эпицентра.

На основе изотерм десорбции паров воды были рассчитаны величины полной, внешней и внутренней удельных поверхностей. Так величина полной удельной поверхности чернозема на контроле составила 137 м²/г. В почве из эпицентра воздействия ШМ она возросла до 182 м²/г. Несколько иным было соотношение величин внешней удельной поверхности. На контроле она составила 65 м²/г, а в образцах чернозема из эпицентра воздействия ШМ 58 м²/г.



Изменение показателя категорий удельных поверхностей чернозема в результате действия ШМ отразилось на ее гидрофобности.

На основе предложенного А.Д. Ворониным подхода, были рассчитаны косинусы угла смачивания по уравнению [4]:

$$\text{Cos}\alpha = (\text{Wm})_e / \text{Wm},$$

где $(\text{Wm})_e$ – величина монослоя воды рассчитанная по Фарреру, Wm – величина монослоя воды, рассчитанная по БЭТ. Для образцов чернозема из эпицентра они составили 0,32, а на контроле 0,48. Величина самих контактных углов смачивания соответственно были равны 71 и 61 градус, т.е. гидрофобность поверхности почвы из эпицентра заметно увеличилась. Это совпадает с ростом гидрофобности почвы при обработке коронным разрядом и вытекающего из предлагаемого механизма его действия на почву, основанного на структурном переходе в гумусовой матрице почвенных гелей.

Выводы

1 На основе проведенных экспериментов предложен механизм влияния коронного разряда на изменение электропроводности дерново-подзолистой почвы, ее кислотности и содержания в ней свободных аллелотоксинов.

2. В модельных условиях установлена роль газоразрядного электричества в усилении аллелотоксичности почв.

3. Определены свойства чернозема, подвергнутого действию шаровой молнии по сравнению с контрольным образцом: рост электропроводности, увеличение дисперсного состояния и сорбционной способности, изменение гидрофобности поверхности.

4. Установлено, что изменение некоторых свойств почв, обработанных коронным разрядом и подвергнутых воздействию шаровой молнии, происходит сходным образом.

Литература

1. Гордеев А.М., Шешнеев В.Б. Электричество в жизни растений. М.: Наука. 1991. 159 с.
2. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Бычков Д.В., Волков С.А., Костюк А.А. Черников В.А. Электродинамические особенности взаимодействия коронного разряда с поверхностью жидкости. Вестник Московского университета. Сер.3. 2011, № 4 с. 67-74.
3. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв Дисс. док. биол. наук, М., 1981 205–с. В надзач.: МГУ им. М.В. Ломоносова, ф-т Почвоведения.
4. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Горепекин И.В. Методика для оценки эффективности действия стимуляторов прорастания семян. Лесной вестник, 2018, т.22, №6, с.95-101.
5. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И., Пузанова, А.Е., Структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв. Почвоведение, 2014, №9, с.1-12.



УДК 631.4

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВ В ВЫСОТНЫХ ЛАНДШАФТАХ СРЕДНЕГО УРАЛА (ХРЕБЕТ БАСЕГИ)

Самофалова И.А.

Пермский ГАТУ, Пермь, Российская Федерация

samofalovairaida@mail.ru

GRANULOMETRIC INDICATORS OF SOIL IN THE MOUNTAIN LANDSCAPES OF THE MIDDLE URAL

Samofalova I.A.

Perm State Agro-Technological University

Annotation: The assessment of the soil particle size distribution using probabilistic characteristics was carried out. The spatial and profile lithological heterogeneity of the particle size distribution of soils is revealed in the landscapes of the Middle Urals. The transformation of the soil profile by granulometry was determined.

Введение

Гранулометрический состав – фундаментальная характеристика почвы, дающая информацию о классификационной принадлежности почвы, количественно оценить процессы гипергенеза и трансформации твердой фазы (Березин, 1983). Свойства почв зависят от соотношения гранулометрических фракций, определяющих особенности структуры и функции на более высоких уровнях организации почвы (Татаринцев и др., 2008, Федорцев и др., 2014, Самофалова, 2015, Самофалова, 2016, Соромотина, 2017).

Современный уровень развития почвоведения на фоне внедрения информационных технологий во все сферы науки приводит к пониманию необходимости строгого математического количественного описания почв, их свойств, взаимосвязей с факторами почвообразования, точной оценки и прогноза изменений почв при современных процессах (Михеева, 2010, Строгонова, 2012, Самофалова, Шутов, 2015, Самофалова, 2017).

Новые информационные возможности гранулометрического метода изучения почв дают более полное представление о гранулометрическом составе (ГС). В этом отношении интересен метод вероятностной интерпретации распределений частиц по размерам на уровне ГС (Березин, 1983, Березин, 2007, Блохин и др., 2010, Самофалова, 2014).

Содержание гранулометрических фракций в почвах существенно колеблется в пространстве. Причиной варьирования является пространственная и временная нестационарность процессов переноса и седиментации (Михеева, 2010), денудационные процессы (Samofalova, 2015), естественная полигенетичность пород, а также чередование водных и эоловых фаз в истории развития территории (Татаринцев и др., 2008).

Цель исследования – изучить трансформацию профиля горных почв по гранулометрии в высотных ландшафтах Среднего Урала. Задачи исследования: определить гранулометрический состав почв; оценить ГС с помощью вероятностных характеристик; оценить влияние высоты на формирование ГС почв.

Объекты и методы

Исследования проведены на территории заповедника «Басеги», в состав которого входит хребет Басеги (58°56' с.ш.; 58°29' в.д.). Территория относится к горной полосе Урала, где преобладают метаморфические породы: хлоритовые, хлорито-серицитовые, и слюдяные сланцы, кварциты (Соболев, 1968). Хребет Басеги приурочен к полосе устойчивых к



выветриванию кварцито-песчаников осянковой свиты (кварцевые, слюдисто-кварцевые, полевошпатно-кварцевые разновидности), образующими большинство увалов и гор Среднего Урала (Летопись Природы..., 1987). Отложения осянковой свиты распространяются на западном склоне Среднего Урала в 30-36 км от главного водораздела, образуя четко выраженный в рельефе субмеридиональный хребет Басеги. Климат типично горный – большое количество осадков и расчлененный рельеф способствуют усилению поверхностной водной миграции химических элементов. Климатические условия обеспечивают промывной тип режима увлажнения, низкую микробиологическую активность, обусловленную недостатком почвенного тепла, малоактивного разложения органических остатков (Летопись Природы..., 1987).

Объект исследований: горные почвы (Средний Урал). В обработку включены данные 59 разрезов почв, заложенных на горе Северный Басег (954 м н.у.м.) в разных высотных ландшафтах: горно-лесной и парковое редколесье (I группа, 22 шт.), субальпийские луга (II группа, 23 шт.), криволесье (III группа, 7 шт.), горная тундра (IV группа, 7 шт.). Почвенный покров представлен типами почв отделов: *структурно-метаморфические, альфегумусовые, литоземы, глеевые*. Гранулометрический анализ выполнен пипет-методом по Качинскому в лаборатории кафедры почвоведения Пермского ГАТУ. Статистическая обработка аналитических данных проведена в программах Statistica-6 и Microsoft Excel. Для оценки гипергенеза данные обрабатывали отдельно для гумусовых (верхних) горизонтов и условно почвообразующей породы (почво-элювий) методом информационно-логического анализа (ИЛА) в программе ALI.

Результаты и обсуждение

Почвы по содержанию физической глины в мелкозем в I группе почв являются тяжелосуглинистыми и глинистыми разновидностями, во II группе преобладают средне- и легкосуглинистые разновидности, редко встречаются тяжелосуглинистые; в III группе – средне- и легкосуглинистые почвы; в IV группе – легкосуглинистые и супесчаные почвы. Таким образом, с увеличением высоты местности ГС мелкозема почв становится более легким. Корреляционный анализ между высотой местности и содержанием фракций ГС почв показал различную тесноту прямой и обратной взаимосвязи между переменными (0,41-0,98). Это указывает на пестроту химического и минералогического состава гумусовых горизонтов и почво-элювия, и на различные соотношения физического и химического выветривания и процессов почвообразования.

Для установления вклада фракций в формирование почвенного профиля в разных высотных ландшафтах проведен информационно-логический анализ. Данные общей информативности и коэффициенты эффективности каналов связи показывают, что на формирование разновидностей почв оказывают влияние следующие фракции (в порядке убывания): песок > ил > пыль > крупная пыль. Коэффициенты эффективности передачи информации (К) дают количественную оценку зависимости гранулометрических фракций от высоты местности и представляют возможность построить информационно-логическую модель для верхних и нижних горизонтов. Почвообразующие породы в процессе почвообразования претерпевают существенные изменения: происходит трансформация минеральных частиц, накапливается органическое вещество (гумус), а как известно, гумус входит в состав илистой фракции. Результаты ИЛА показали, что наибольший вклад в формирование ГС гумусовых горизонтов имеет ил *и* фракция: *ил > крупный песок > крупная пыль = мелкая пыль > мелкий песок > средняя пыль*. В условно почвообразующей породе решающую роль играет фракция крупного песка и действительно на первичном этапе



почвообразования в трансформации минеральной массы играют гидротермические условия, под воздействием которых идет физическое разрушение и измельчение горных пород и рыхлых отложений: *крупный песок > мелкий песок > ил > крупная пыль > мелкая пыль > средняя пыль.*

Оценка ГС мелкозема горных почв проведена с помощью вероятностных характеристик распределений Φ_5 , k , α , n по Березину (Березин, 1983, Березин, 2007).

По доле глинных компонентов (Φ_5) ГС мелкозема почв изменяется от супесчаного до глинистого. Распределение разновидностей по высотным поясам следующее: в горно-лесном – глинистые, тяжелосуглинистые, среднесуглинистые; в субальпийских лугах и криволесье – легкосуглинистые, среднесуглинистые; в горной тундре доля глинных компонентов резко снижена, ГС почв супесчаный. С помощью ИЛА установлено, что для гумусовых горизонтов почв в горно-лесном поясе и парковом редколесье (300-500 м н.у.м.), наиболее специфичным является содержание глинных компонентов более 40%, а в почво-элювии – более 60%, что соответствует тяжелосуглинистому и глинистому составу (табл. 1). Таким образом, в процессе почвообразования, в горной тайге проявляется некоторое облегчение ГС в верхней части профиля в сравнении с почво-элювием. В почвах на высоте 500-700 и 700-900 м отмечается дифференциация профиля по содержанию глинных компонентов. В горной тундре (> 900 м) ГС почв является, как правило, легким.

По дисперсности глинных компонентов можно сказать, что чаще в почвах встречаются грубодисперсные и среднедисперсные, реже высокодисперсные частицы. Дисперсность глинных компонентов k в почвах изменяется с высотой нелинейно. Высокодисперсные глинистые компоненты содержатся в верхних горизонтах в почвах на высоте ниже 500 м и выше 900 м н.у.м, а на высотах 500-900 м наиболее специфично содержание грубодисперсного материала. То есть, глинные компоненты в почвах под субальпийскими лугами и в криволесье прошли более длительный путь трансформации и доля участия в их формировании крупных фракций значительна. Дисперсность почво-элювия изменяется с высотой местности иначе: ниже 500 м материал характеризуется как высокодисперсный, на уровне 500-700 м грубодисперсный, выше 700 м среднедисперсный.

Таблица 1. Специфичные состояния гранулометрических показателей в почвах

| Показатель | Горизонт | Высотные ландшафты, м над уровнем моря | | | |
|----------------|----------|--|---------|-----------|-----------|
| | | 300-500 | 500-700 | 700-900 | > 900 |
| Φ_5 , % | Верхний | 40-60; >60 | 20-30 | 20-30 | <20 |
| | Нижний | >60 | >30 | <20 | <20 |
| k | Верхний | <0,30 | >0,40 | >0,40 | <0,30 |
| | Нижний | <0,30 | >0,40 | 0,31-0,40 | 0,31-0,40 |
| α , мкм | Верхний | 31-50 | <20 | 31-50 | <20 |
| | Нижний | 21-30 | 31-50 | 31-50 | <20 |
| n | Верхний | 3,1-4,0; >4,0 | 2,1-3,0 | <2,0 | <2,0 |
| | Нижний | >4,0 | 2,1-3,0 | <2,0 | <2,0 |

Примечание: Φ_5 – содержание глинных компонентов; k – дисперсность глинных компонентов, α – зернистость или средний диаметр песчаных частиц; n – отсортированность песчаных частиц

Существует связь между величиной показателя k и минералогическим составом глинных компонентов (Березин, 1983). Установлено, что в почвах, формирующихся ниже 700 м н.у.м. отсутствует минералогическая дифференциация профиля. Однако, абсолютные значения показателя свидетельствуют о различном минералогическом составе почв в горной



тайге (возможное преобладание высокодисперсных минералов вермикулит-монтмориллонитовой группы) и под луговой растительностью (преимущественное содержание грубодисперсных минералов хлорит-иллитовой группы). Минералогическая дифференциация профиля почв в криволесье и тундре может указывать на разный возраст горизонтов профиля: в тундре (> 900), верхний горизонт моложе, чем почво-элювий; в криволесье, напротив, верхний горизонт имеет больший возраст, чем почво-элювий.

Наиболее устойчивая к разрушению часть ГС почв – это песчаные компоненты. Зернистость песчаных компонентов (α) варьирует от незернистых до грубозернистых. В горно-лесном поясе преобладающими являются среднезернистые песчаные компоненты в гумусовом горизонте и тонкозернистые в почво-элювии. В почвах субальпийских лугов на высоте 500-700 м для верхних горизонтов более специфичным является содержание незернистых песчаных компонентов, а в почво-элювии – среднезернистых. В почвах криволесья песчаные компоненты в профиле характеризуются как среднезернистые, в горной тундре – незернистые. Таким образом, наименьший диаметр песчаных частиц отмечен в почвах тундры, что может означать, во-первых, интенсивное физическое, химическое, биологическое разрушение наименее стойких первичных минералов на фоне уменьшения размеров песчаных частиц; во-вторых, более длительное время воздействия процессов гипергенеза, что может указывать на больший возраст почв тундры.

Степень сортированности песчаных частиц изменяется с высотой местности: увеличивается с понижением абсолютной высоты от неотсортированных в почвах в горной тундре до сильноотсортированных в почвах в горно-лесном поясе. По степени сортированности песчаных частиц более дифференцированы профили почв горно-лесного пояса. В почвах, формирующиеся на высоте более 700 м (криволесье и горная тундра), наиболее специфичным состоянием является неотсортированность песчаных компонентов. Неотсортированность при малом среднем диаметре песчаных частиц в почвах горной тундры может свидетельствовать о постоянном поступлении свежего выветрелого минерального материала, а также органического.

Установлена степень влияния гранулометрических показателей (Φ_5 , k , α , n) на гранулометрический состав верхних и нижних горизонтов (табл. 2).

Таблица 2. Результаты информационно-логического анализа

| Показатель | Φ_5 | k | α | n |
|---|-------------|-------------|-------------|------|
| верхние минеральные горизонты | | | | |
| Т (бит) | 0,51 | 0,23 | 0,34 | 0,29 |
| К | 0,30 | 0,13 | 0,20 | 0,17 |
| условно почвообразующая порода (почво-элювий) | | | | |
| Т (бит) | 0,26 | 0,26 | 0,12 | 0,16 |
| К | 0,15 | 0,17 | 0,07 | 0,09 |

Примечание: Т – общая информативность; К – коэффициент эффективности передачи связи

Так, ГС верхних горизонтов почв зависит в первую очередь от содержания глинных компонентов, среднего диаметра песчаных частиц, затем, от сортированности песчаных частиц и степени дисперсности глинистых компонентов. Формирование ГС почво-элювия в большей степени связано с дисперсностью глинных компонентов и их содержанием. Свойства песчаных компонентов в почво-элювии передают мало информации, что указывает на отсутствие фактической связи.



Выводы

Гранулометрический состав почв хребта Басеги закономерно изменяется в пространстве от супесчаной в тундре до глинистой разновидности в горной тайге. С помощью вероятностных характеристик ГС установлено, что в почвах интенсивно протекают процессы трансформации, переноса и локализации тонкодисперсного материала и преобладает содержание среднедисперсных и грубодисперсных частиц различной отсортированности и зернистости. Процессы гипергенного разрушения и перераспределения первичных пород в большей степени проявляются на высоте 300-700 м. Формирование гранулометрического профиля почвы в значительной степени зависит от наличия глинистых компонентов в гумусовых горизонтах почв, а также от степени их дисперсности в почвообразующих породах. В высотных ландшафтах Среднего Урала (хребет Басеги) выявлена пространственная и профильная литологическая неоднородность гранулометрического состава почв. Это указывает на разновозрастность высотных ландшафтов и почв, полигенетичность профилей.

Литература

- Березин П.Н. (1983) Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород. *Почвоведение*. № 2. С. 52-64.
- Березин П.Н. (2007) Интерпретация и представление результатов гранулометрического анализа. В кн.: Теории и методы физики. М.: «Гриф и К», С. 79-84.
- Блохин А.Н., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. (2010) Характеристика гранулометрического и агрегатного составов почв северной части ареала черневой тайги Кузнецкого АЛТАУ с использованием параметров вероятностных функций. *Вестник Томского ГУ*. №2 (10). С 15-19.
- Летопись Природы «Заповедник «Басеги» (1987). Гремячинск, 267 с.
- Михеева И.В. (2010) Изменение вероятностных распределений фракций гранулометрического состава каштановых почв Кулудинской степи под воздействием природных и антропогенных факторов. *Почвоведение*. №12. С. 1456-1467.
- Самофалова И.А. (2014) Математические методы интерпретации гранулометрического состава почв. Информационные системы и коммуникативные технологии в современном образовательном процессе: сборник научных трудов / редкол.: Т.С. Волкова, Ю.Б. Шувалова;. М-во образ. и науки Пермского края, ФГБОУ ВО Пермская ГСХА, Центр СПИ, Белорусский ГАТУ. Пермь: ИПЦ «Прокрость», С. 88-90.
- Самофалова И.А. (2015) Гранулометрия почв подгольцового пояса на Среднем Урале. «Агротехнологии XXI века»: Материалы Всерос. научно-практ. конф. Пермская ГСХА. С. 115-120.
- Самофалова И.А. (2016) Диагностика горных почв по гранулометрии. Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общ. почв-в им. В.В. Докучаева. Часть I / Отв. ред.: С.А. Шоба, И.Ю. Савин. Москва-Белгород: Издат. дом «Белгород». С. 375-376.
- Самофалова И.А. (2017) Информационно-логический анализ дифференциации почвенного покрова высотных геосистем на Среднем Урале. *Вестник Алтайского ГАУ*. № 11 (157). С. 105-114.
- Самофалова И.А., Шутов П.С. (2015) Использование ГИС-технологий для пространственной дифференциации геосистем на территории заповедника «Басеги». Материалы Межрегиональной научно-практической конференции «Геоинформационное



- обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, ГИС центр ПГНИУ. С. 112-120.
- Соболев И.Д. (1968) Основные черты глубинного строения Урала. *Глубинное строение Урала*. М.: Наука, С. 28-37.
- Соромотина К.С.(2017) Структурная формула гранулометрического состава горных почв (Заповедник «Басеги»). Мат-ы Межд. науч. кон-и XX Докучаевские молодежные чтения. СПб., С. 382.
- Строганова М.Н. (2012) Информационная технология образования в почвоведении. «Живые и биокосные системы». №1; URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-1/article>
- Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М. (2008) Физическое состояние агропочв колочной степи в зависимости от текстуры гранулометрического состава. *Вестник Алтайского ГАУ*, № 10 (48). С. 33-38.
- Федорец Н.А., Глебова Н.А. и др. (2014) Особенности гранулометрического состава автоморфных почв северо- и среднетаежной подзон Карелии. *Ученые записки Петрозаводского ГУ*. № 8. Том 1. С. 65-70.
- Samofalova I.A. (2015) Granulometry features in Mountain Soils. *Book of proceedings: Sixth International Scientific Agricultural Symposium «Agrosym 2015»*, Jahorina, October 15-18, P. 1383-1387.



УДК 631.582:631.434.12

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОПРОЧНЫХ АГРЕГАТОВ В БЕССМЕННОМ ЧИСТОМ ПАРУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ.

Савоськина О.А.¹, Шевцов В.А.², Заверткин И.А.³

^{1,3} факультет агрономии и биотехнологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва,
Российская Федерация
soa-18@mail.ru

² полевая опытная станция РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Savochkina O. A., Shevtsov V. A., Zavertkin I. A
faculty of agronomy and biotechnology, Russian state agrarian University-MTAA named after K. A. Timiryazev,
Moscow, Russian Federation

Annotation: On sod-podzolic soils, the arable layer will have a stable addition, if it contains at least 40-45% of water-supply units, if below this level, the soil is rapidly compacted, its physical properties deteriorate. In the absence of vegetation cover (pure steam), the change in the content of water-line aggregates depended on the doses and type of fertilizers.

Введение

Действие факторов интенсификации земледелия на почву невозможно полно оценить без длительного мониторинга за состоянием и трансформацией различных показателей плодородия, в том числе и агрофизических, определяющих продуктивность и экологическую устойчивость как конкретных агроландшафтов, так и агроэкосистем в целом. В настоящее время наиболее острой является проблема агрофизической деградации почвенного покрова при его высокой окультуренности. Именно длительные стационарные опыты, благодаря временному фактору, позволяют оценить направленные тенденции в изменении физических почвенных свойств (Матюк, Стюхин, Кашеева, 2012; Мазиров, Матюк, Полин, Малахов, 2017; Мазиров, Матюк, Полин, Малахов, 2018).

Объекты и методы

Объектом исследования был почвенный покров бессменного пара в Длительном опыте, который представлен дерново-подзолистой легкосуглинистой почвой. Длительный полевой опыт ТСХА был заложен в 1912 году А.Г. Дояренко. Он расположен на территории полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в Москве.

Опыт трехфакторный (Длительный полевой опыт..., 2012).

Фактор А – размещение культур (с 1912 г.).

Варианты фактора А: 1. Бессменно (поля 121-126); 2. Севооборот (поля 131-136).

На одной половине опытного поля развернут шестипольный зернопаропропашной севооборот: 1 - пар чистый, 2 - озимая рожь, 3 – картофель, 4 - ячмень с подсевом клевера, 5 – клевер, 6 – лен, а на другой культуры выращиваются бессменно.

Фактор В – удобрение (с 1912 г.).

Варианты фактора В: 1. Контроль (без удобрений); 2. Навоз; 3. NPK; 4. NPK+навоз; 5. PK; 6. NK; 7. NP; 8. K; 9. P; 10. N.

С 1973 по 2015 гг. в качестве минеральных удобрений вносятся аммиачная селитра (N - 34,5%), суперфосфат двойной гранулированный (P₂O₅- 45,0%), калий хлористый (K₂O - 60%)



при дозах по действующему веществу - N - 100; P₂O₅ - 150; K₂O - 120 кг/га; органических - навоз 20 т/га.

Фактор С – химическая мелиорация (с 1949 г.).

Варианты фактора С: 1. Без извести; 2. Известь.

Известкование проводится по полной гидролитической кислотности один раз в ротацию севооборота.

Содержание водопрочных агрегатов определяли методом мокрого просеивания на приборе Бакшеева (Шеин, Карпачевский, 2007).

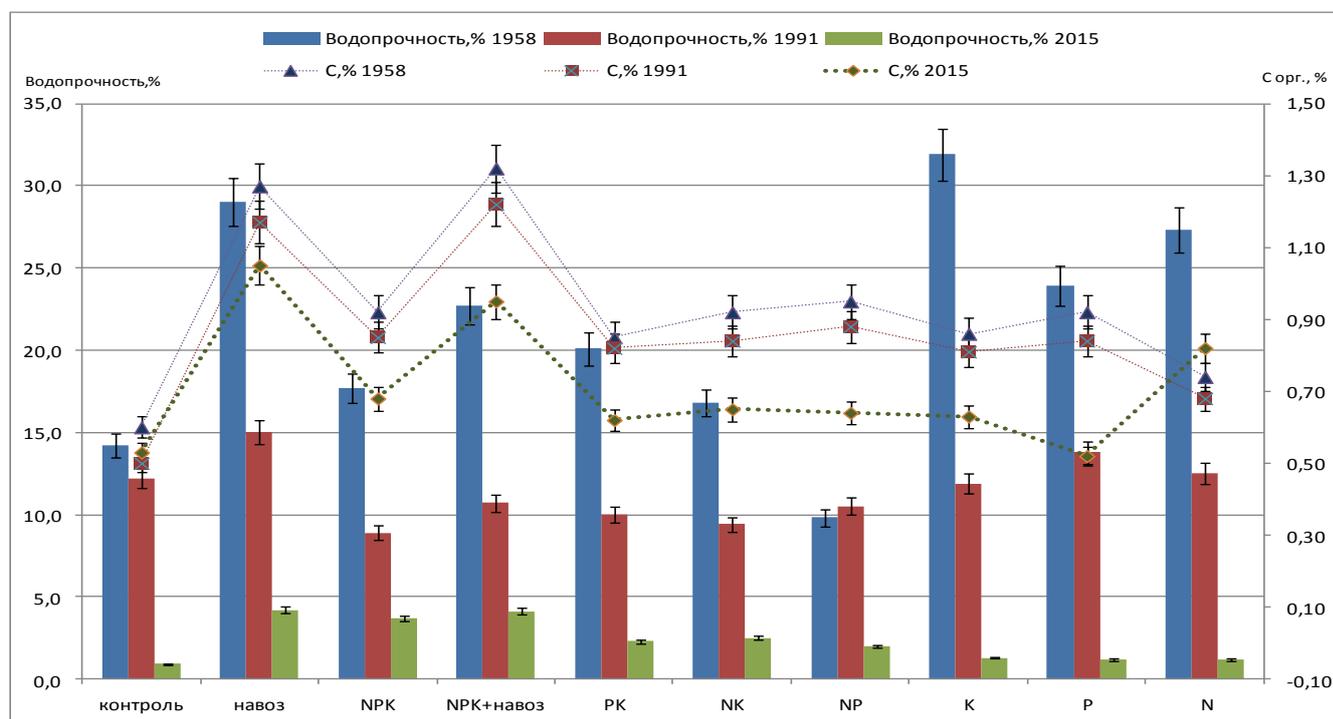
Результата и обсуждение

Изменение строения почвы опытного участка, расположенного на склоне, после 103-летнего периода воздействия природных и антропогенных факторов, разной степени интенсивности, тесно связано с содержанием водопрочных агрегатов.

Содержание в почве водопрочных агрегатов служит критерием для оценки и прогнозирования устойчивости сложения пахотного слоя, что является необходимой предпосылкой для теоретического обоснования различных приемов обработки почвы.

Как показали исследования, на дерново-подзолистых почвах, пахотный слой будет обладать устойчивым сложением, если в нем будет содержаться не менее 40-45% водопрочных агрегатов, если ниже этого уровня, то почва быстро уплотняется, ухудшаются ее физические свойства.

При отсутствии растительного покрова (чистый пар) изменение содержания водопрочных агрегатов зависело от доз и вида удобрений (рис. 1).



$$R_{1958г} = 0,26, R_{1991г} = 0,11, R_{2015г} = 0,74$$

Рис. 1. Изменение содержания водопрочных агрегатов (%) в бессменном чистом пару в зависимости от уровня окультуренности (C_{орг.}, %)



Обобщение данных за длительный период (1958-2015 гг.) показало, что в чистом пару в варианте без удобрений количество водопрочных агрегатов снизилось с 14,2% (1958 г.) до 2,5% (2015 г.).

Такая же закономерность, но с большими различиями отмечалась и в вариантах внесения одно- и двухкомпонентных минеральных удобрений.

Внесение полного минерального удобрения и навоза, а также их сочетание несколько замедляли процессы разрушения структуры почвы, особенно в первые периоды функционирования опыта (1958-1991 гг.), которые усиливались в дальнейшем (1991-2015 гг.) из-за снижения структурообразовательного эффекта промораживания – оттаивания в период потепления климата.

В среднем структурное состояние почвы бессменного чистого пара характеризуется как неудовлетворительное по содержанию водопрочных агрегатов (21,3%).

В качестве «восстановителей» структуры вносились известь и навоз. Повышенные дозы минеральных и органических удобрений не компенсировали деградацию почвенной структуры.

Проведение мокрого просеивания в 2015 году показало, что по количеству водопрочных агрегатов почва бессменного пара по всем вариантам внесения удобрений характеризуется как бесструктурная – содержание агрономически ценных агрегатов не превышало 5%. На ситах диаметром 0,25-1,00 мм оставались фракции только за счет механического состава почвы – песчаных частиц и мелкого хряща кварцевых зерен, что свидетельствует о том, что почва в бессменном чистом пару прочных структурных агрегатов практически не содержит.

Далее исследованиями установлено, что с увеличением суммарно вносимых доз физиологически кислых минеральных удобрений отмечается процесс подкисления почвенного раствора и разрушение водопрочной структуры, что увеличивает потребность в химической мелиорации почвы. Периодическое (раз в ротацию) внесение извести по полной гидролитической кислотности поддерживает на оптимальном уровне реакцию среды и создает условия для улучшения структурного состояния почвы, за счет увеличения доли Ca^{++} и Mg^{++} в ППК.

Сельскохозяйственные культуры, возделываемые бессменно или в севообороте, также оказывали различное влияние на сохранение и поддержание устойчивого сложения почвы за счет увеличения содержания водопрочной структуры (таблица 1).

Колебания по содержанию водопрочных агрегатов отмечаются при сравнении влияния бессменного возделывания озимой ржи и в севообороте (поле 132). В 1958 году при низких урожаях озимой ржи чередование культур способствовало существенному повышению содержания агрономически ценных агрегатов, по сравнению с монокультурой (на 19,5% по фону без извести и на 12,0% по фону извести), что связано с положительной ролью возделывания клевера и увеличением количества растительных остатков в севообороте.

Начиная с 13 ротации севооборота (1991 год и по настоящее время) тенденция поменялась, что связано с введением новых высокоурожайных сортов и с потеплением климата, обуславливающим увеличение засоренности бессменных посевов, а, следовательно, и увеличение поступления пожнивно-корневых остатков. Образованию агрономически ценных агрегатов также способствовало механическое действие корневых систем сорных и культурных растений агрофитоценоза.

Таблица 1. Влияние способа использования пашни на динамику содержания водопрочных агрегатов на вариантах без удобрений (%).



| Культура | 1958 г. | | 1991 г. | | 2015 г. | |
|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| | по извести | без извести | по извести | без извести | по извести | без извести |
| Чистый пар | - | 14,2 | - | 12,2 | - | 0,9 |
| Картофель | 28,9 | 22,2 | 20,8 | 10,4 | 12,3 | 6,8 |
| Озимая рожь | 47,9 | 35,5 | 42,9 | 29,7 | 29,3 | 31,1 |
| Севооборот | 59,9 | 55,0 | 36,0 | 36,7 | 21,2 | 16,4 |
| Минимум | 28,9 | 14,2 | 20,8 | 10,4 | 12,3 | 0,9 |
| Максимум | 59,9 | 55,0 | 42,9 | 36,7 | 29,3 | 31,1 |
| Среднее | 45,6 | 31,7 | 33,2 | 22,2 | 20,9 | 13,8 |
| Медиана | 47,9 | 28,9 | 36,0 | 20,9 | 21,2 | 11,6 |
| Ст. отклон. | 15,6 | 17,8 | 11,3 | 13,0 | 8,5 | 13,2 |

В 2015 году на варианте бессменного возделывания озимой ржи содержание водопрочных агрегатов на 14,7% (без извести) и 8,1% (по извести) было выше, чем в севообороте, что связано с отсутствием разрушающего действия на структуру почвы чистого пара и картофеля.

Усиление механического воздействия при использовании традиционной технологии возделывания картофеля на низкоплодородных почвах (вариант без удобрений) обостряет деградацию почвенной структуры, которая выражается в снижении содержания водопрочных агрегатов с 25,6% (1958 г.) до 9,6% (2015 г.). Однако отмечаем положительную роль химической мелиорации почвы. Периодическое известкование, увеличивая долю Ca^{++} в ППК, повышает содержание водопрочных агрегатов на 6,1% по сравнению с вариантом без известкования.

В своих работах академик Вильямс (1898-1931гг) подчеркивал, что необходимо создавать в пахотном слое не менее 80% прочных агрономически ценных агрегатов размером 0,25-10,00 мм, чтобы придать почве окультуренное состояние. Для дерново-подзолистых почв на начальных этапах окультуривания содержание водопрочных агрегатов на уровне 30-40% считается оптимальным.

Установленные в Длительном опыте тенденции изменения агрофизических свойств под влиянием разных приемов окультуривания (способ размещения культур, органические и минеральные удобрения, известкование) имеют принципиальное значение для совершенствования технологий возделывания культур на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах разной степени окультуренности.



Рис. 2. Длительный опыт. (Снимок с портала Google 2013 год).

Выводы

Скорость и степень деградации агрофизических показателей плодородия дерново-подзолистой почвы определяются соотношением разнонаправленных процессов минерализации и накопления гумуса, зависящих от способа использования пашни, массы поступающих в почву органических веществ и технологии возделывания полевых культур. Длительное (более 100 лет) парование почвы ведет к снижению содержания органического углерода с 2,04% (1912 г.) до 0,65% (2015 г.), что сопровождается полным разрушением водопрочной структуры.

Литература

1. Длительный полевой опыт 1912-2012 / Краткие итоги научных исследований. Под редакцией академика РАСХН В.М. Баутина, 2012. - 27 с.
2. Матюк, Н.С. Влияние длительного применения удобрений и известкования на физико-химические показатели плодородия почвы под полевыми культурами в бессменных посевах и севообороте / Н.С.Матюк, А.Ю.Стюхин, Д.М.Кащеева // Длительному полевому стационарному опыту ТСХА 100 лет. Итоги научных исследований. – М.: 2012. - С. 105.
3. Шеин, Е.В. Теории и методы физики почв: Коллективная монография / под ред. Е.В.Шеина и Л.О.Карпачевского. - М.: «Гриф и К», 2007. – 614 с.
4. Мазиров М.А., Влияние разных систем обработки и удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы / Мазиров М.А., Матюк Н.С., Полин В.Д., Малахов Н.В. // Земледелие. 2018. № 2. С. 33-36.
5. Мазиров М.А. Изменение агрохимических показателей плодородия почвы при длительном окультуривании / Мазиров М.А., Матюк Н.С., Полин В.Д., Малахов Н.В. // Владимирский земледелец. 2017. № 1 (79). С. 15-19.



УДК 631.43

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ ПЕСКА И ИЛА НА МИКРОСТРУКТУРУ И РЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Салимгареева О.А.¹, Которова М.С.^{1,2}

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

tavtava@yandex.ru

² «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля», Москва, Российская Федерация

mkotorova.igce@gmail.com

THE INFLUENCE OF ADDITION OF SAND AND SILT ON THE MICROSTRUCTURE AND RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SOD-PODZOLIC SOIL IN MOSCOW REGION

Salimgareeva O.A., Kotorova M.S.

¹Faculty of soil science Moscow state University, Moscow, Russia

²"Institute of global climate and ecology named after academician Y. A. Israel", Moscow, Russia

Annotation: The impact of shear load on highly concentrated suspension of samples of sod-podzolic soil with different grading resulted in formation of a more dense microstructure because of shift of mineral grains and microaggregates. At the same time, clay particles are combined into complexes of flakes located on the surface of grains. The sod-podzolic soil horizon AY in forest biogeocenosis after removal of silt fraction has the highest ability to restore structure.

Введение

Физико-механические (реологические) свойства дерново-подзолистых почв достаточно хорошо изучены (Манучаров, Абрикова, 1983; Ключева, Хайдапова, 2017), так же достаточно подробно исследовано строение этих почв от макро до суб-микроуровня (Таргульян и др.1974, Шоба, 2007). Однако особенности изменения микростроения этих текстурно-дифференцированных почв и его взаимосвязь с физико-механическими свойствами дерново-подзолистой почвы при создании заданного гранулометрического состава изучены мало.

Целью работы явилось исследование влияния внесения песка и ила на микроструктуру и реологическое поведение дерново-подзолистой почвы. Были поставлены следующие задачи: 1) создать модели почв разного гранулометрического состава путём добавления разного количества песчаной и илистой фракции в гумусовый и минеральный горизонты дерново-подзолистой почвы; 2) определить особенности микростроения модельных образцов методом сканирующей электронной микроскопии; 3) измерить кривые течения исследуемых образцов, дать оценку особенностей реологического поведения изучаемых объектов и выявить его связь с микростроением.

Объекты и методы

Объектом исследования явились образцы почвенных горизонтов агродерново-подзолистой среднесуглинистой глееватой старопашотной почвы (гор. РУ1) и дерново-подзолистой (гор. АУ, ВТ2) Пушкинского района Московской области. Разрез дерново-подзолистой лесной почвы заложен в лесном массиве (сложный ельник) рядом с с. Ельдигино (N 56.0982°; E 37.8268°) (профиль почвы: РУ1-РУ2-EL-ELB-ВТ1-ВТ2g-BCg), разрез агродерново-подзолистой почвы расположен поблизости (N 56.1312°; E 37.8036°), под



залежь (профиль почвы: О-АУ-ЕЛ-ВЕЛ-ВТ1-ВТ2). Названия горизонтов даны согласно классификации 2004 г. Почвообразующие породы представлены покровными суглинками. Песок был взят в ОАО «Раменский горно-обогатительный комбинат» и представлен фракцией 1-0,25 мм.

Для формирования легкого суглинка к гор. РУ1 старопахотной дерново-подзолистой почвы добавили разные количества песка, путем смешивания с сухой почвой, растертой и просеянной через сито 1мм. В работе представлен вариант с 35 % внесенного песка. Из образцов горизонтов АУ, ВТ2 дерново-подзолистой лесной почвы были выделены илистые фракции <0,001 мм по методике Айдиняна (Айдинян, 1960). В дальнейшем были исследованы как образцы почв без ила, так и модельные варианты с добавлением 5% ила к образцам АУ и ВТ2 лесной дерново-подзолистой почвы.

Электронно-микроскопические исследования проводили на сканирующем растровом электронном микроскопе JEOL-6060A (фирмы JEOL, Япония) (далее СЭМ), напыление образцов производили платиной, используя установку JFC-1600 (фирмы JEOL, Япония).

В процессе исследования определены: гранулометрический состав методом лазерной дифрактометрии на приборе «Analysette 22 comfort», содержание общего углерода на приборе экспресс анализатор углерода АН – 7529 методом сухого сжигания, плотность твердой фазы почвы с помощью пикнометров (Шейн и др., 2007). Структурно-механические (реологические) свойства были изучены по реологическим кривым – кривым течения (основной и дополнительной), полученным на ротационном вискозиметре «РЕОТЕСТ – 2» с цилиндрическим измерительным устройством (Шейн и др., 2017).

Результаты и обсуждение

Некоторые физико-химические свойства исследуемых образцов и модельных субстратов разного гранулометрического состава представлены в таблице 1. Верхний горизонт дерново-подзолистой почвы под лесом имеет более тяжелый гранулометрический состав, по сравнению с верхним горизонтом почвы под агроценозом хотя содержание физической глины в нем больше всего на 3%. Содержание общего углерода, согласно полученным данным, в верхнем горизонте ненарушенной почвы выше почти в 2 раза, по сравнению с РУ1. В легкоглинистом горизонте ВТ2 содержится очень мало органики ($C_{\text{общ.}} = 0,12\%$).

Таблица 1. Некоторые физико-химические свойства исследуемых образцов.

| Образец | Содержание физической глины (частиц < 0,01 мм), % | Категория гран. состава по Н.А. Качинскому | Содержание общего углерода С, % | Плотность твердой фазы, г/см ³ |
|---------------|---|--|---------------------------------|---|
| Песок | - | песок | 0 | 2,65 |
| РУ1+35% песка | 25,5 | Легкий суглинок | 0,81 | 2,57 |
| РУ1 | 39 | Средний суглинок | 1,25 | 2,53 |
| АУ | 42 | Тяжелый суглинок | 2,43 | 2,34 |
| ВТ2 | 53 | Глина легкая | 0,12 | 2,35 |

Предварительное изучение песка под бинокулярным микроскопом показало, что он в основной своей массе состоит из прозрачных зерен кварца без примесей. Рассмотрение при помощи СЭМ позволило выявить высокую окатанность зерен (рис. 1, а), которая характерна и для зерен кварца этой фракции дерново-подзолистой почвы на моренных отложениях (Добровольский, Шоба, 1978). Встречаются зерна кварца с раковистым изломом. Некоторые



зерна имеют шероховатый рельеф с мелкими равномерно рассеянными углублениями (рис. 1, а, b). Илистая фракция, выделенная из почвенных горизонтов, при рассмотрении СЭМ после высушивания представляет собой не отдельные частицы, а формирует в основном агрегаты (рис. 1, с), характерные для почв и рыхлых отложений и называемые чешуйками, псевдокристаллами. «Глинистая чешуйка – тот «кирпичик», который формирует общее микростроение суглинистых и глинистых почв» (Добровольский, Шоба, 1978, с 34).

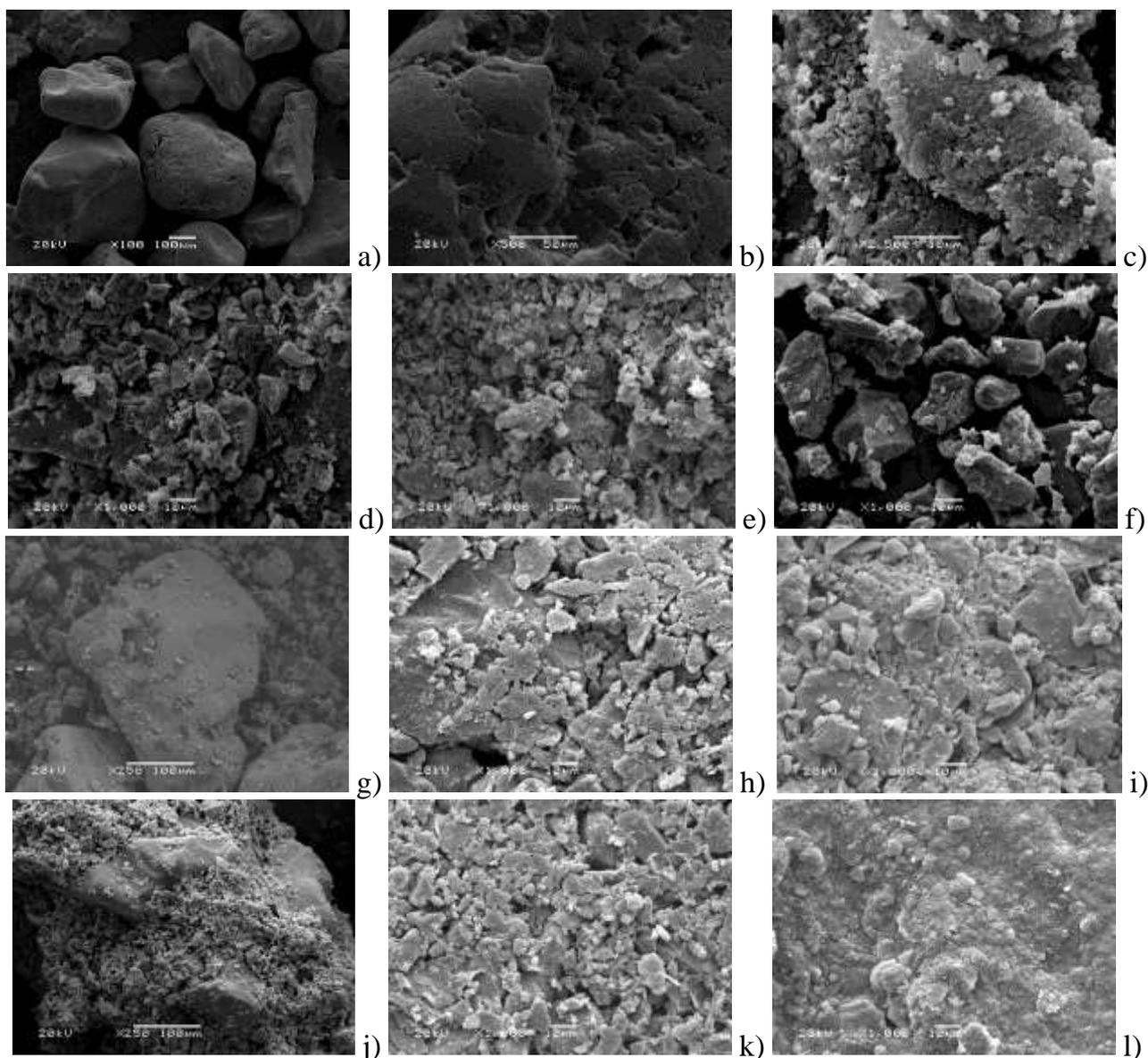


Рис.1. Микростроение поверхности частиц: песка - а) x100, б) x500; с) ила из гор. АУx2500; горизонтов: x1000 d) АУ, е) РУ1, ф) АУ без ила; x250 г) РУ1+35% песка; после воздействия сдвиговой нагрузки- x1000 h) АУ i) РУ1, к) ВТ2 без ила, л) ВТ2+5% ила; x250 j) РУ1+35% песка.

Горизонты АУ дерново-подзолистой и РУ1 агродерново-подзолистой почвы имеют мелкокомковатую структуру плотного сложения. По цвету несколько отличаются, так как в верхнем слое лесной почвы значительно больше гумуса: РУ1 окрашен неоднородно - на сером фоне имеются более темные пятна; АУ – серовато бурого цвета. По микростроению РУ1 более однородный. Санирующая электронная микроскопия показала, что первичные педы имеют компактное сложение под воздействием цементации частиц гумусово-глинистой



плазмой (рис. 1, d, e). Для горизонтов АУ дерново-подзолистой и РУ1 агродерново-подзолистой почвы характерен матричный тип микростроения глинистого вещества согласно базовым типам микростроения С.А. Шобы (2007).

После воздействия сдвиговой нагрузки на высококонцентрированную суспензию происходит формирование более плотной микроструктуры путем перемещения минеральных зерен и разрушения, либо переупаковки микроагрегатов. При этом глинистые частицы объединяются в комплексы чешуек, расположенных на поверхности зерен (Рис. 1, h). Ранее было отмечено, что увеличение внешнего давления может привести к переориентации глинистых частиц и к увеличению площади переходного контакта и образованию фазового контакта, которые перестают быть обратимыми по отношению к воде (Шоба, 2007). После воздействия сдвиговой нагрузки на суспензию образцов гор. АУ и РУ1 тип микростроения глинистого вещества становится чешуйчато-турбулентным.

Это подтверждают и реологические кривые, на которых наблюдаются петли дилатансии, особенно значительные во втором цикле (рис. 2, а-с). Физической основой изменения напряжения сдвига является вязкость (внутреннее трение слоев высококонцентрированной суспензии) (Caton, Baravian. 2008). Очевидно, большее содержание гумуса и количества тонких фракций обуславливает более высокую величину R_{k1} - «предела Шведова» - начало течения почвенной суспензии верхнего горизонта лесной дерново-подзолистой почвы 191,4 Па В агродерново-подзолистой почве эта величина равна 115 Па. Критическое напряжение сдвига R_{k2} гор. АУ (425 Па) лесной почвы почти в 8 раз выше, чем для гор. РУ1 (55 Па) на залежи, следовательно, начало разрушения структуры наступает для почвы на залежи при гораздо меньших напряжениях сдвига. Величина соотношения R_{k1}/R_{k2} в гор. РУ1 пахотной почвы (2,09) почти в 5 раз выше, чем для гор. АУ лесной (0,45), что свидетельствует о более высоких дилатантных свойствах верхнего слоя дерново-подзолистой почвы агроценоза.

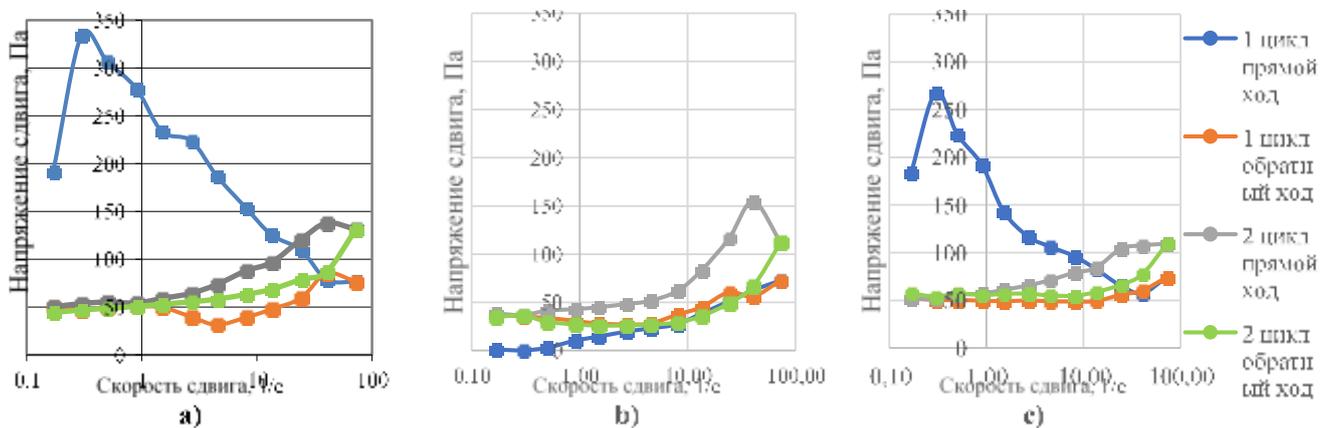


Рис.2. Зависимость напряжения сдвига (τ , Па) от скорости сдвига (γ , s^{-1}): а) гор. АУ исходный; б) АУ без ила, с) гор. АУ +5% ила.

При добавлении песка к сухим образцам горизонта РУ1 агродерново-подзолистой почвы и перемешивании в течение 10 минут поверхности песчаных частиц остались в основном свободными, лишь в небольших углублениях наблюдалось некоторое количество более мелких частиц (Рис.1, g). После воздействия сдвиговой нагрузки песчинки переместились внутрь агрегатов, из которых явно проглядывает их поверхность. Поверхность зерен покрыта отдельными глинистыми чешуйками и их небольшими скоплениями (Рис.1, j).



При добавлении ила 5% в гор. АУ наблюдается видимое значительное увеличение количества илистых частиц, которые образуют высокую сомкнутость после воздействия сдвиговой нагрузки (рис.1, i). Характер реологической кривой не изменяется (рис. 2, а, с), лишь несколько уменьшаются пределы прочности (P_m с 75,5 до 59,4 Па), хотя способность структуры к восстановлению несколько увеличивается ($\eta_{кон}/\eta_{кл}$ с 0,26 до 0,35).

При сравнении снимков гор. АУ: исходного и обезиленного (рис.1, е, f) отмечено, что в модельных образцах действительно содержится гораздо меньше тонких фракций, хотя фрагментарно еще встречаются ЭПЧ меньше 1мкм, что вероятно связано с присутствием устойчивых к воде микроагрегатов. Выделяется множество минеральных зерен с очищенной поверхностью. При воздействии сдвиговой нагрузки оставшиеся локально илистые частицы объединяются между собой и способствуют агрегированию, о чем свидетельствует большая величина начала течения почвенной суспензии во втором цикле, в первом эта величина минимальная по сравнению с всеми другими образцами. При помощи СЭМ мы также видим эту картину. Представляется важным, что именно обезиленный образец гор. АУ обладает наибольшей способностью структуры к восстановлению.

Микростроение гор. ВТ2 дерново-подзолистой почвы под лесом обнаруживает особенности, характерные для текстурного горизонта: высокую плотность упаковки и сцементированность ЭПЧ и микроагрегатов, вероятно за счет большего содержания ила и гидроксидов железа и алюминия, склеивающего глинистые частицы и покрывающего зерна первичных минералов. Образцы гор. ВТ2 без ила имеют логично меньшее количество тонкой фракции и большее количество свободных поверхностей минеральных зерен, по сравнению с исходными. Но после воздействия сдвиговой нагрузки на эти образцы оставшиеся илистые частицы объединились и образовали поверхностный слой на минералах с высокой сомкнутостью (рис. 1, k). Исходный же образец не обнаруживает столь значимого различия после воздействия сдвиговой нагрузки.

При добавлении 5% ила к образцу гор. ВТ2 дерново-подзолистой почвы под лесом после воздействия сдвиговой нагрузки наблюдается более плавный микрорельеф, при котором происходит объединение в сплошной илистый покров, образующий поверхность, характерную для кутан (рис. 1, l).

Выводы

После воздействия сдвиговой нагрузки на высококонцентрированную суспензию образцов дерново-подзолистой почвы разного гранулометрического состава происходит формирование более плотной микроструктуры путем перемещения минеральных зерен и микроагрегатов. При этом глинистые частицы объединяются в комплексы чешуек, расположенных на поверхности зерен.

Горизонт АУ дерново-подзолистой почвы под лесом после удаления илистой фракции и воздействия сдвиговой нагрузки обладает наибольшей способностью структуры к восстановлению.

Литература

Айдинян Р.Х. (1960) Извлечение ила из почвы. Краткая инструкция. М.: Гипроводхоз, 10 с.

Добровольский Г.В., Шоба С.А. (1978) Растровая электронная микроскопия почв. М.: Изд-во МГУ, 144 с.



Клюева В.В., Хайдапова Д.Д. (2017) Реологические свойства образцов естественного и нарушенного сложения дерново-подзолистой и агродерново-подзолистой почвы // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. Т. 89. С. 21–35.

Манучаров А.С., Аbruкова В.В. (1983) Структурно-механические свойства дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. № 4. С. 64–73.

Таргульян В.О. и др. (1974) Организация, состав и генезис дерново-палево-подзолистой почвы на покровных суглинках: Морфологическое исследование. М.: Наука, С. 55.

Шеин Е.В. и др. (2007) Теории и методы физики почв // М.: Гриф и К, 2007.

Шеин Е. В. И др. (2017) Практикум по физике твердой фазы почв: учебное пособие. М., Буки-Веди, 119 с.

Шоба С.А. (2007) Морфогенез почв таежно-лесной зоны. – М.: НИИ-Природа, 299 с.

Caton F., Baravian C. // Rheol. Acta. 2008. V. 47. P. 601.



УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ ТЯЖЕЛОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА В РЕЗУЛЬТАТЕ АГРОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Симонова Ю.В., Федорова Н.Н., Романов О.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
uvsim@yandex.ru

TRANSFORMATION OF THE HYDROSORPTION PROPERTIES OF CLAY SOILS AS A RESULT OF THE CULTIVATION

Simonova J.V., Fedorova N.N., Romanov O.V.
Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Annotation: When comparing the humus horizons of soils forming on varved clays in natural and agrocenosis, the difference in the hydrosorption capacity is evident. The maximum hygroscopic moisture, the specific surface area and the capillary sorption hysteresis increase. These changes are associated with the weakening of the eluviation and the enhancement of the humus-accumulative process and humification.

Введение

Известно, что из характеристик твердой фазы почвы наибольшее влияние на гидросорбционную способность имеет степень дисперсности, минералогический состав, состав обменных катионов, количество и состав органического вещества, наличие растворимых солей. Почвы, сформированные на породах тяжелого гранулометрического состава, такие как, например, элювиально-метаморфические почвы на ленточных глинах, имеют изначально высокий уровень водоудерживающей способности в сорбционной области влаги, что создает условия для развития процессов оглеения. Задача агрогенной трансформации гидросорбционных свойств таких почв должна быть направлена на уменьшение водоудерживающей способности относительно почвообразующей породы в области формирования мономолекулярного слоя, соответствующей наибольшему количеству прочносвязанной воды, и усилению проявления сорбционного гистерезиса в области начала капиллярной конденсации, что, вероятно, может быть достигнуто ослаблением элювиального процесса, увеличением содержания гумуса, степени насыщенности основаниями, улучшением структурного состояния.

Цель настоящего исследования — выявить тенденцию изменения гидросорбционных свойств почвы элювиально-метаморфического генезиса при окультуривании.

Объекты и методы

Изучали гидросорбционные свойства целинной дерново-элювиально-метаморфической глинисто-иллювирированной глееватой почвы на ленточных глинах и агродерново-элювозема глубокопахотного глееватого на ленточных глинах (Ленинградская обл., Лисинский лесхоз). Дерново-элювиально-метаморфическая почва под лесной растительностью является естественным аналогом агродерново-элювозема, что позволяет при сравнении этих почв связывать различия их гидросорбционных характеристик с процессами агрогенной трансформации.

Базовые физико-химические показатели почвы определяли общепринятыми методами: гранулометрический состав — пипет-методом по Качинскому, содержание Сорг — по



Тюрину, групповой и фракционный состав гумуса — по Кононовой-Бельчиковой. Водоудерживающую способность в области сорбционной влаги оценивали в гумусовых горизонтах и ленточной глине на основании данных о равновесной влажности, установившейся над насыщенными растворами солей с относительным давлением водяного пара P/P_0 : 0.07; 0.22; 0.33; 0.62; 0.75; 0.86; 0.98. Величину полной удельной поверхности вычисляли по уравнению БЭТ, внешнюю — по уравнению Фаррера, внутреннюю — находили по разности полной и внешней. Величину гидросорбционного гистерезиса оценивали исходя из различий равновесных влажностей в циклах иссушения-увлажнения.

Результаты и обсуждение

Профиль дерново-элювиально-метаморфической почвы, развитой под лесной растительностью, характеризуется резким разделением на гумусово-аккумулятивную и минеральную части, присутствием частично оторфованного гумусового горизонта малой мощности, тяжелым гранулометрическим составом, наличием признаков оглеения в нижней части. Основные физико-химические показатели данной почвы приведены в табл. 1. Органическое вещество гуматно-фульватного типа резко убывает с глубиной. В элювиальной части профиля почва имеет сильнокислую реакцию среды и низкую емкость катионного обмена (ЕКО). Уменьшение кислотности, увеличение ЕКО и степени насыщенности основаниями (V) происходит вниз по профилю по мере приближения к богатой основаниями породе.

Таблица 1. Базовые физико-химические показатели почв

| Горизонт | Глубина, см | Сорг, % | Сгк/ Сфк | рН | | $\Sigma(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+})$ мг-экв/100 г почвы | ЕКО | V % | Физ. глина | Ил |
|--|----------------|------------|-------------|------|-----|--|------|--------|---------------|----|
| | | | | водн | сол | | | | | |
| Дерново-элювиально-метаморфическая почва на ленточных глинах | | | | | | | | | | |
| AY | 0–5 | 2.6 | 0.7 | 4.2 | 3.9 | 8.3 | 11.0 | 75 | 71 | 5 |
| EL | 5–17 | 0.9 | 0.6 | 4.5 | 3.7 | 3.3 | 6.0 | 55 | 86 | 7 |
| BEL | 17–37 | 0.5 | 0.7 | 5.0 | 3.7 | 11.9 | 14.0 | 85 | 89 | 9 |
| BMt,g | 37–69 | 0.4 | 0.2 | 6.0 | 4.4 | 18.0 | 22.0 | 82 | 94 | 24 |
| BCg | 69–90 | 0.4 | 0.0 | 6.4 | 5.0 | 19.8 | 21.8 | 91 | 95 | 28 |
| Cg | 90–110 | 0.4 | 0.0 | 7.1 | 6.1 | 23.5 | 24.0 | 98 | 97 | 42 |
| Агродерново-элювозем на ленточных глинах | | | | | | | | | | |
| P1 | 0–24 | 5.8 | 1.2 | 5.5 | 5.1 | 20.2 | 23.5 | 86 | 37 | 18 |
| P2 | 24–43 | 4.3 | 0.5 | 4.9 | 4.3 | 18.3 | 20.4 | 90 | 61 | 36 |
| EL | 43–52 | 0.7 | 0.0 | 4.7 | 4.0 | 9.0 | 11.9 | 76 | 63 | 38 |
| Cg | 95–100 | 0.2 | 0.0 | 5.9 | 4.6 | 16.5 | 17.8 | 93 | 64 | 36 |

В профиле агродерново-элювозема присутствуют морфологические и физико-химические признаки, характерные для окультуренных почв (табл. 1). Почва имеет менее



дифференцированный по илу профиль, мощный агрогумусовый горизонт с высоким содержанием органического вещества и слабокислой реакцией среды. В пахотной толще наблюдается расширение отношения $S_{гк}/S_{фк}$, изменение типа гумуса на фульватно-гуматный, увеличение ЕКО и V.

Вовлечение лесных почв, развитых на ленточных глинах, в сельскохозяйственный оборот оказывает влияние на изменение их водно-физических, в том числе гидросорбционных, свойств (табл. 2).

Таблица 2. Изменение гидросорбционных свойств почв при окультуривании

| Горизонт | Глубина, см | МГ, % | Эффективная удельная поверхность, м ² /г | | |
|--|-------------|-------|---|---------|------------|
| | | | Полная | Внешняя | Внутренняя |
| Дерново-элювиально-метаморфическая почва на ленточных глинах | | | | | |
| AУ | 0–5 | 5.3 | 46 | 28 | 18 |
| C _г | 90–110 | 12.9 | 73 | 44 | 29 |
| Агродерново-элювозем глубокопахотный глееватый на ленточных глинах | | | | | |
| P1 | 0–24 | 7.6 | 53 | 36 | 17 |
| C _г | 95–100 | 12.8 | 73 | 45 | 28 |

При сопоставлении гидросорбционных свойств целинной и пахотной почв отмечаются близкие величины показателей табл. 2 в почвообразующей породе и отличные в гумусовых горизонтах. В горизонте P1 по сравнению с AУ наблюдается увеличение максимальной гигроскопической влаги (МГ), что, вероятно, связано с большим содержанием илстых частиц в пахотных горизонтах агродерново-элювозема (табл. 1) вследствие ослабления их выноса из гумусовой толщи в процессе агрогенеза. Увеличение же в пахотном горизонте общей удельной поверхности за счет прироста внешней может быть объяснено как изменением степени дисперсности, так и изменением качества поверхности частиц в отношении сорбции воды в результате изменения микроагрегатного состояния.

Тяжелый илесто-пылеватый состав и особенности микростроения, задаваемые ленточными глинами, определяют изначально высокий уровень адсорбированной влаги изученных нами почв. Тем не менее анализ изотерм адсорбции-десорбции водяного пара гумусовых горизонтов и породы (рис. 1) позволяет говорить о снижении количества адсорбированной влаги в гумусовых горизонтах по сравнению с почвообразующей породой во всей гигроскопической области влажности. Особенно это снижение заметно в интервале относительных давлений $P/P_0 > 0.6$, соответствующем началу капиллярной конденсации.

Пахотный и гумусовый горизонт целинной почвы имеют близкие значения равновесных влажностей в диапазоне формирования мономолекулярного слоя воды $0 < P/P_0 < 0.4$, то есть наиболее прочносвязанной влаги. В области полимолекулярной сорбции $0.4 < P/P_0 < 0.6$ и в большей мере в области начала капиллярной конденсации $P/P_0 > 0.6$ различия между почвами выражены сильнее. В пахотном горизонте в этом интервале относительных давлений происходит увеличение доли пленочной влаги, что имеет экологическое значение для функционирования почвенной нано- и микрофауны.

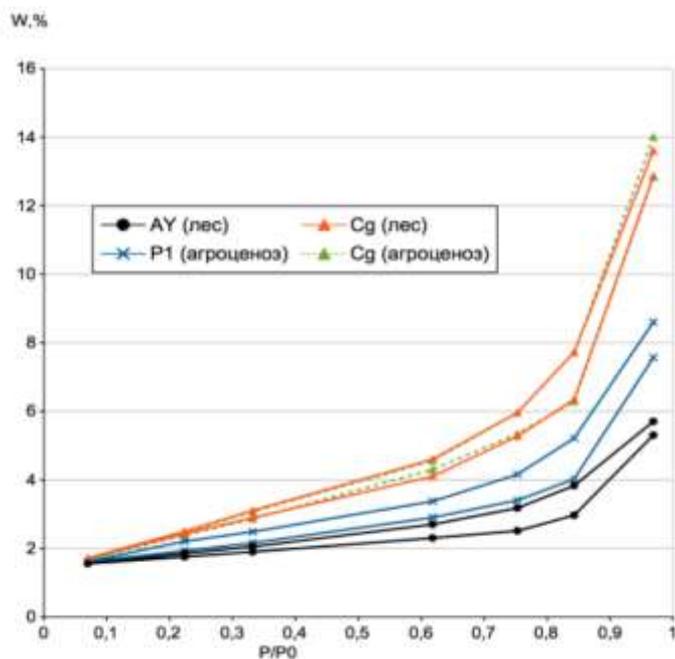


Рис. 1. изотермы адсорбции и десорбции паров воды дерново-элювиально-метаморфической почвы и агродерново-элювозема: нижняя ветвь — кривая иссушения; верхняя ветвь — кривая увлажнения

частиц и возрастания гистерезиса в пахотном горизонте окультуренной почвы (Шваров, Коренева, 2008).

Выводы

1. В результате агрогенной трансформации в аккумулятивной части пахотной почвы по сравнению с породой отмечено уменьшение, а по отношению к гумусовому горизонту целинной почвы — увеличение содержания удельной поверхности и сорбированной влаги. Эти изменения, как и гистерезисные явления, особенно заметны в области начала капиллярной конденсации.

2. Изменение гидросорбционных свойств при вовлечении в сельскохозяйственный оборот может быть объяснено повышением содержания гумуса, его гуматности и количества поглощенных катионов, а также улучшением микроагрегатного состояния агрогенно-преобразованной почвы.

Литература

- Зубкова Т.А., Манучаров А.С., Черноморченко Н.И., Шваров А.П., Костарев И.А. (2005) Гидросорбционный гистерезис в почвах, минералах и породах. *Почвоведение* **9**, 1122–1129. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9152876>.
- Шваров А.П., Коренева Е.А. (2008) Явление гистерезиса зависимости капиллярно-сорбционного потенциала воды от влажности почвы. *Почвоведение* **10**, 1179–1187. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11532881>.

Тенденции агрогенной трансформации дерново-элювиально-метаморфической почвы, связанные с улучшением микроагрегированности, привели к увеличению площади внешней удельной поверхности (табл. 2), спровоцировавшему, в свою очередь, проявление гидросорбционного гистерезиса (Зубкова и др., 2005). Величина гистерезиса возросла во всем диапазоне гигроскопической влаги в агрогумусовом горизонте P1 пахотной почвы как по сравнению с почвообразующей породой, так и с гумусовым горизонтом целинной почвы (рис. 1). Повышение гуматности и глубины гумификации органического вещества на фоне увеличения его содержания, предположительно, влияют на перераспределение гидрофильных и гидрофобных компонентов органического вещества в пользу последних, что также является причиной усиления гетерогенности поверхности



УДК: 631.431.5

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ РАЗНЫХ ВЫСОТНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЯСОВ ПРИПОЛЯРНОГО УРАЛА

Старцев В.В.¹, Хайдапова Д.Д.², Дымов А.А.¹

¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

vik.startsev@gmail.com

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS OF DIFFERENT HIGH-ALTITUDE VEGETATION BELTS OF THE SUBPOLAR URAL

Startsev V.¹, Khaydapova D.², Dymov A.¹

¹Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the RAS, Syktывkar, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The paper presents the data of rheological studies of soil properties, polar Urals. The data on the nature of interparticle bonds and the behavior of different soils under the influence of mechanical loads were obtained for the first time using the amplitude scan method on the MCR-302 rheometer. The structuring effect of organic matter (SOM) on the physical and mechanical properties of soils was revealed. Soils with a high content of SOM have the greatest plasticity.

Введение

Реология - наука о течении и деформациях материальных тел, о качестве структурных связей, преобладающих в теле и об их прочностных свойствах (Теории и методы..., 2007). В последнее время реологические исследования в почвоведении набирают все большую популярность (Mezger, 2011, Pertile et al., 2016, Kholopov et al., 2018) поскольку позволяют дать количественную характеристику почв и их устойчивости к механическим нарушениям. Однако работы по реологии почв затрагивают равнинные области и почвы сельскохозяйственного значения (Ghezzehei, Or, 2001, Хайдапова и др., 2016). Реологические свойства почв горных территорий практически неизучены.

Цель работы – изучить реологические свойства почв разных высотных поясов Приполярного Урала.

Объекты и методы исследований

Объектами исследования являлись только два верхних минеральных горизонта почв разных высотных растительных поясов Приполярного Урала. Согласно (Горчаковский, 1975) выделяют горно-тундровый (преобладающий тип почв – подбуры) (600-800 м над ур. моря), подгольцовый (серогумусовые) (500-600 м над ур. моря), горно-лесной высотные пояса (подзолы) (400-500 м над ур. моря). Благодаря ранее проведенным исследованиям (Дымов и др., 2013, Дымов, Жангуров, 2014, Старцев и др., 2017) показано, что горно-тундровый пояс на Приполярном Урале может формироваться в подножьях склонов (300-400 м над ур. моря) из-за подстилания многолетнемерзлых льдистых пород (ММП) (криоземы/подбуры). Всего выбрано 16 почвенных разрезов по 4 из каждого растительного пояса.

Содержание углерода и азота определяли на элементном анализаторе EA-1110 (Carlo Erba, Италия) в Экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Реологические параметры были получены на модульном реометре MCR-302 (Anton-Paar, Австрия) с применением программного обеспечения RHEOPLUS/32 V3.60. Основные



характеристики метода: 30 точек измерения, 15 секунд – длительность измерения одной точки, частота 0,5 Hz, диапазон деформации γ от 0,001 до 100 % log, сила воздействия верхнего плеча $NF < 5N$, постоянная температура 20° C. Образец массой 3 г (просеянный через сито 1 мм) помещали в пластмассовый цилиндр и ставили в кристаллизатор с дистиллированной водой для капиллярного насыщения почвы в течение суток. Для характеристики образца были проанализированы: LVE-range – диапазон вязкоупругого поведения образца, область устойчивости образца к нагрузкам; модуль упругости G' (Па) – является мерой энергии сдвига деформации, которая направлена на возмещение полученной деформации структур и характеризует упругое поведение материала, характеризует межчастичное взаимодействие исследуемой системы почвенного образца; Crossover – точка, показывающий предел текучести образца, после которой вязкое поведение преобладает над упругим (полное разрушение структуры) (Margraf et al., 2006, Mezger, 2011, Хайдапова и др., 2016).

Результаты и обсуждение

Выявлено, что верхние минеральные горизонты всех исследованных почв обладают слабыми межчастичными контактами, чем нижележащие. Показано, чем выше модуль упругости (G'), тем сильнее взаимодействие между частицами в почве (Табл. 1). Наиболее сильными контактами характеризуются верхние минеральные горизонты подзолов горно-лесного пояса ($G' = 14.6 \times 10^5$). Несколько более низкими значениями обладают почвы подгольцового (6.29×10^5), горно-тундрового пояса (7.31×10^5) и почвы с ММП (9.95×10^5). Вероятно, это связано с содержанием органического вещества в почвенных горизонтах. Верхние минеральные горизонты характеризуются большим содержанием ОБ, поглощают и при набухании удерживают большее количество влаги, что мешает частицам взаимодействовать и установить крепкие связи (Oubora et al., 2018). Показатель влажности максимального набухания отражает эту взаимосвязь. Большое количество влаги впитывают образцы с высокими концентрациями органического углерода. Для верхних минеральных горизонтов максимальной влажностью обладают почвы с подстиланием ММП (96.1 %), минимальной – подзолы (48.1 %). Вторые минеральные горизонты характеризуются более сильными межчастичными контактами ($13.3-19.3 \times 10^5$), но меньшей максимальной влажностью набухания (37.9-66.5 %).

Диапазон упругой деформации характеризует устойчивость образца. Исследованные почвы имеют близкие значения. Существуют различия между верхними и нижележащими минеральными горизонтами. Вероятно, органическое вещество оказывает структурирующее действие на почвенные частицы. Максимальными значениями деформации обладают верхние минеральные горизонты, которые содержат больше ОБ (Margraf et al., 2012). Первые минеральные горизонты характеризуются более высокими значениями упругой деформации, чем вторые на 1.3-1.7 % (Табл. 1). Минимальные значения упругой деформации для верхних минеральных горизонтов получены для почв горно-лесного пояса 0.004 % (n=4), для почв других поясов значения упругой деформации составили 0.006-0.007 %. Значения деформации в диапазоне вязкоупругого поведения для вторых минеральных горизонтов варьировали от 0.003 до 0.004 %. Минимальные значения были также выявлены для почв горно-лесного пояса.

В точке разрушения структуры (Crossover) величина пластичной деформации, после которой почва переходит в вязкое состояние, отражает характер пластичности образца. Максимальные значения пластичной деформации в верхних минеральных горизонтах имеют почвы с ММП 4.8 % (n=4).



Таблица 1. Реологические свойства исследованных почв

| Горизонты почв, n=4 | Диапазон вязкоупругого поведения (LVE-range) | | Пластичная деформация (Crossover), % | Влажность максимального С, % набухания, % | |
|-------------------------------------|--|---|--------------------------------------|--|----------|
| | Упругая деформация, % | Модуль упругости (G', 10 ⁵ Па) | | | |
| Горно-тундровый пояс | | | | | |
| I | 0.007±0.004 | 7±5 | 4.2±2.3 | 76±48 | 1.9-13.2 |
| II | 0.004±0.001 | 17±5 | 2.5±1.4 | 38±6 | 1.0-1.6 |
| Подгольцовый пояс | | | | | |
| I | 0.007±0.002 | 6±3 | 4.4±2.2 | 80±25 | 2.5-8.2 |
| II | 0.004±0.001 | 19±7 | 1.1±0.8 | 66±32 | 0.8-1.9 |
| Горно-лесной пояс | | | | | |
| I | 0.004±0.001 | 14±6 | 2.7±1.3 | 48±5 | 1.3-3.5 |
| II | 0.003±0.001 | 18±7 | 2.4±0.7 | 50±6 | 0.8-4.5 |
| Горно-тундровый пояс с ММ II | | | | | |
| I | 0.006±0.003 | 10±8 | 4.8±2.9 | 96±65 | 0.8-22.2 |
| II | 0.004±0.001 | 13±7 | 3.1±2.1 | 57±26 | 0.7-4.3 |

Примечание: I – верхний минеральный горизонт, II – второй минеральный горизонт, n=4 – повторность.

Минимальные значения пластичной деформации выявлены для почв горно-лесного пояса – 2.72 %. Вторые минеральные горизонты имеют более низкие значения – 1.1-3.0 %. При большем содержании органического вещества в почвах и при большей влажности максимального набухания поведение почв более пластично.

Выводы

1. Установлено, что верхние минеральные горизонты обладают слабыми межчастичными контактами по сравнению с нижележащими горизонтами из-за большего содержания ОВ.
2. Наиболее устойчивыми в диапазоне вязкоупругого поведения являются почвы горно-тундрового, подгольцового пояса и с подстиланием ММП. Почвы горно-лесного пояса характеризуются минимальными значениями диапазона упругой деформации.
3. Органическое вещество играет ключевую роль в формировании пластичного поведения почв, повышает устойчивость и мешает переходу в вязкообразное состояние.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-34-00618 мол_a



Литература

- Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорий Урала. М.: Наука. 1975. 248 с
- Дымов А.А., Жангуров Е.В., Старцев В.В. Почвы северной части Приполярного Урала: морфология, физико-химические свойства, запасы углерода и азота // Почвоведение. 2013. № 5. С. 507-516.
- Дымов А.А., Жангуров Е.В. Разнообразие и генетические особенности почв Приполярного Урала // Пермский аграрный вестник. 2014. № 3 (7). С. 45-52.
- Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Характеристика почв высотных поясов хребта Яптикнырд (Приполярный Урал) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2017. № 38. С. 6-27.
- Хайдапова. Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955-963.
- Kholopov Y.V., Khaidapova D.D., Lapteva E.M. Rheological properties of automorphic and semihydromorphic cryometamorphic northern taiga soils in northeastern european Russia (Komi Republic). Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51, no. 4. P. 418-427. doi.org/10.1134/S1064229318040075.
- Markgraf, W., Horn, R., Peth, S. 2006. An approach to rheometry in soil mechanics–Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. Soil Tillage Res. 91. 1-14. DOI: 10.1016/j.still.2006.01.007.
- Mezger, T.G. 2011. The Rheology handbook. Vincentz Network, Hanover.
- Peter Bilson Oboura, Johannes L. Jensen, Mathieu Lamandéa, b, Christopher W. Watts, Lars J. Munkholma. Soil organic matter widens the range of water contents for tillage. Soil & Tillage Research 182 (2018) 57-65. Doi.org/10.1016/j.still.2018.05.001.
- Teamrat A. Ghezzehei, Dani Or. Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses. Soil Science Society of America Journal. 2001. 65(3):624-637. DOI: 10.2136/sssaj2001.653624x.
- Wibke Markgraf, Chris W. Watts, W. Richard Whalley, Tomislav Hrkac, Rainer Horn. Influence of organic matter on rheological properties of soil. Applied Clay Science 64 (2012) 25-33. doi:10.1016/j.clay.2011.04.009.
- Pertile P., Reichert J.M., Gubiani P.I., Holthusen D., Costa A. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils // Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2016. Vol. 40(0). doi: 10.1590/18069657rbcs20150286.



УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ УРБАНОЗЕМОВ РАЗНОГО СТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ Г. МОСКВЫ

Сусленкова М.М.¹, Умарова А.Б.¹, Гасина А.И.¹, Бутылкина М.А.¹, Кокорева А.А.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
suslenkovamaria@gmail.com

TRANSFORMATION OF STRUCTURAL FUNCTIONAL ORGANIZATION OF MODEL SOILS
CONSTRUCTIONS WITH DIFFERENT STRUCTURE IN THE CONDITIONS OF MOSCOW

Suslenkova M.M., Umarova A.B., Gasina A.I., Butylkina M.A., Kokoreva A.A.
Lomonov Moscow State University, Faculty of Soil Science

Annotation: 3 variants of model soil constructions were created. Variant 1 (control) is made from Aarable horizon (0-18cm); variant 2 (layered construction) is represented by Aarable horizon (0-6cm), lowland peat (6-12cm), sand (12-18cm); variant 3 is a mixture of Aarable horizon, peat and sand in the same mass proportion as in the layered variant (0-18cm). Water retention capacity of Aarable horizon increased in 2 variant, where it is underlain by peat. Number of macropores increased and number of mezopores decreased in Aarable horizon of control and layered variants. The greatest number of moisture-saiving pores is observed in the peat-containing layers of variants 2 and 3 as a result of 4-year functioning. The lowest content is in the control in all layers.

Введение

Одной из наиболее информативных характеристик структурно-функциональной организации почв является кривая водоудерживания, представляющая собой зависимость между капиллярно-сорбционным давлением влаги и влажностью почвы (Воронин 1986, Глобус 1987, Шеин 2007). Именно эта характеристичная кривая показывает соотношение пор разного размера и, одновременно, ее подвижность и доступность почвенной влаги для растений. Реперными точками на кривой водоудерживания являются почвенно-гидрологические константы, значения влажностей которых соответствуют определенному давлению (Шеин 2005). Это дает возможность провести количественную оценку пор и проанализировать структуру порового пространства почв (Шеин, Скворцова 2016, Воронин 1986). Стоит отметить, что сама влага, ее количество влияет на формирующуюся структуру почвы, особенно при переуплотнении почв (Birle 2008, Casini 2012). Поэтому важное значение имеет пространственная организация твердой фазы почв, образующая сложную сеть пор. Большой интерес с позиции изменения структуры и свойств твердой фазы представляют почвы городских территорий – урбаноземы, т.к. они подвержены быстрой трансформации уже в первые годы своего функционирования.

Цель работы – исследовать структурно-функциональную организацию почв урбаноземов разного строения и ее трансформацию через 4 года после их закладки в условиях г. Москвы путем изучения водоудерживающей способности почвенных слоев, как отражение пространственной организации порового пространства почв.

Объекты и методы

Объектом исследования стали почвенные конструкции разного строения, расположенные на территории Почвенного стационара МГУ имени М.В.Ломоносова. В 2012 году были созданы 3 варианта модельных урбаноземов с максимально выравненными свойствами почвенных слоев путем их тщательного перемешивания при закладке. Профили конструкторземов следующие: 1) вариант 1 (контроль) - гор. А пах (0–18 см); вариант 2



(слоистая конструкция) - гор. А пах (0–6 см), торф низинный (6–12 см), песок карьерный (12–18 см); вариант 3 (смесь) – смесь гор. А пах, торфа и песка в том же массовом соотношении, что и в слоистой конструкции (0–18 см). Все конструкции подстилалась гор. Апах (18-24 см) и располагались в одинаковых условиях (Сусленкова, 2018). Наблюдения велись в период с 2012 по 2016 год.

В 2012, 2014 и 2016 годах были отобраны образцы нарушенного и ненарушенного строения (монолиты). Монолиты были отобраны в пластиковые кольца диаметром 4,5 см и высотой 2 см. Для сохранения естественной влажности образцы были герметично упакованы и помещены в холодильник до начала лабораторного эксперимента.

Определение верхней части основной гидрофизической характеристики (ОГХ) проводили методом десорбции влаги над насыщенными растворами солей, нижней части – тензиостатическим методом на почвенных монолитах (Шеин, 2007) в режиме иссушения.

По полученным кривым был произведен расчет распределения пор по размерам (Шеин, 2005). На основе экспериментальных данных для аппроксимации ОГХ была использована модель ван Генухтена в программе RETC (Y. Mualem, 1976).

Все определения проводились в трехкратной повторности; статистическая обработка данных производилась с помощью стандартных функций электронных пакетов MSExcel и Statistica.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены кривые водоудерживания горизонтов конструкций. Кривые исходных образцов (рис. 1а) имеют типичную форму в соответствии с их генезисом: гор. Апах - характерную для почв суглинистого гранулометрического состава пологую форму, песок - S-образную форму кривой, расположенной ниже остальных, что свидетельствует о его низкой водоудерживающей способности. Кривая ОГХ торфа, напротив, расположена выше всех на графике. Для смеси, включающей торф, также обнаружена высокая водоудерживающая способность. Хотя ее кривые имеют более выраженную S-образную форму, чем у торфа, что обусловлено, видимо, с иным соотношением пор разного диаметра.

К 2016 г водоудерживающая способность поверхностного гор. Апах в составе варианта 1 уменьшилась: кривая ОГХ стала располагаться ниже исходной (рис. 1b). При расположении гор. Апах на поверхности торфа (вариант 2) его способность удерживать влагу увеличилась, кривая водоудерживания 2016 г. сместилась вверх относительно кривой 2012 г. (рис. 1c). Это связано с тем, что в гор. Апах проникают фрагменты хорошо набухающего торфа по крупным порам пахотного слоя, что было зафиксировано визуально при разборе конструкций. В слоях торфа и песка слоистой конструкции (рис. 1e и f) кривые ОГХ приобрели более выраженную S-образную форму, что отражает увеличение свободно подвешенной влаги и уменьшение пленочной. При этом левая часть кривой ОГХ песчаного слоя сместилась вверх, что свидетельствует о возрастании сорбции воды. В смеси (вариант 3, рис. 1d) кривые водоудерживания всех слоев сместились вниз, что указывает на снижение водоудерживающей способности этого варианта и может быть связано с уменьшением содержания органического вещества почвы с 6% до 3,4%. Стоит отметить, что наибольшее изменение водоудерживающей способности и содержания органического вещества в этом варианте наблюдается в поверхностных горизонтах, что может быть вызвано, в том числе, повышенной активностью зообиоты, в наибольшей степени обитающей именно в данном варианте конструктоземов.

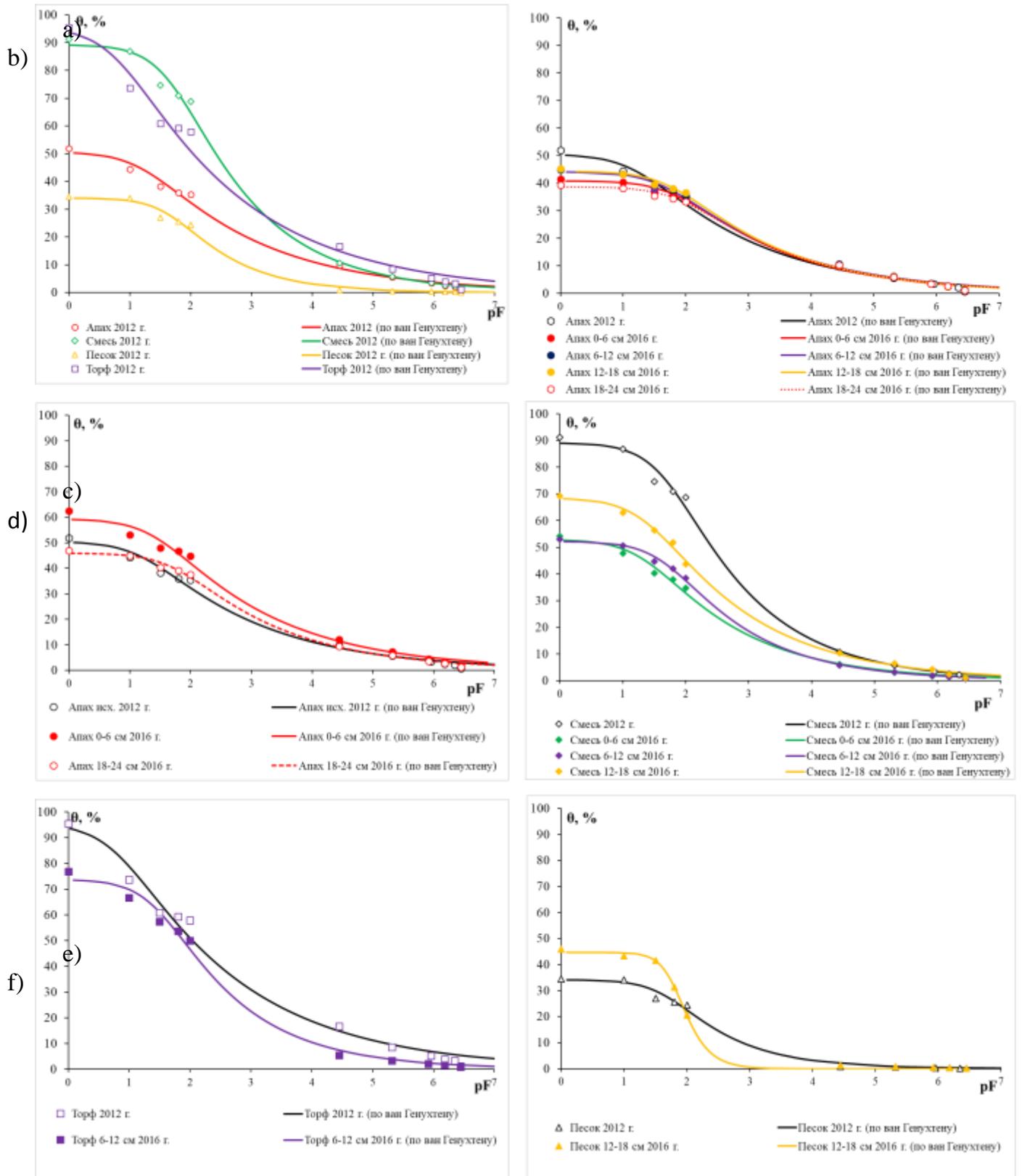


Рис. 1. Основные гидрофизические характеристики: а) исходных образцов 2012 г.; б) варианта 1; в) варианта 2; д) варианта 3; е) торфа (варианта 2); ф) песка (варианта 2).

Была проведена аппроксимация кривой ОГХ уравнением ван Генухтена, основными параметрами которого являются θ_s , θ_r , α и n (таблица 1). Считается, что параметр θ_s близок по величине объемной влажности полного насыщения почвы, хотя при математическом



описании кривой ОГХ в преобладающем большинстве он имеет меньшие значения, чем пористость почв (Умарова, 2014). Параметр α – величина, обратно пропорциональная давлению вхождения воздуха в почву, “давление барботирования”, а параметр n представляет собой характеристику угла наклона кривой ОГХ. Для всех параметров было проведено сравнение по t -критерию (с уровнем значимости 0,05), которое показало, что параметры выборок значимо отличаются друг от друга.

Таблица 1. Параметры аппроксимации (средние значения)

| | | | R^2 | θ_s | α | n |
|------|------------------|----------------|-------|------------|----------|-------|
| 2012 | Исходные образцы | Апах | 0,993 | 50,577 | 0,620 | 1,236 |
| | | Смесь | 0,997 | 89,179 | 0,212 | 1,328 |
| | | Торф | 0,988 | 95,526 | 1,752 | 1,219 |
| | | Песок | 0,994 | 34,133 | 0,213 | 1,444 |
| 2016 | Вариант 1 | Апах 0-6 см | 0,998 | 40,813 | 0,144 | 1,255 |
| | | Апах 6-12 см | 0,996 | 44,144 | 0,216 | 1,244 |
| | | Апах 12-18 см | 0,997 | 44,310 | 0,169 | 1,257 |
| | | Апах 18-24 см | 0,997 | 38,666 | 0,122 | 1,251 |
| | Вариант 2 | Апах 0-6 см | 0,991 | 59,423 | 0,379 | 1,238 |
| | | Торф 6-12 см | 0,994 | 73,668 | 0,356 | 1,334 |
| | | Песок 12-18 см | 0,998 | 44,695 | 0,147 | 2,581 |
| | | Апах 18-24 см | 0,997 | 45,997 | 0,181 | 1,262 |
| | Вариант 3 | Смесь 0-6 см | 0,996 | 52,857 | 0,453 | 1,299 |
| | | Смесь 6-12 см | 0,999 | 52,244 | 0,216 | 1,338 |
| | | Смесь 12-18 см | 0,998 | 68,445 | 0,422 | 1,275 |
| | | Апах 18-24 см | 0,998 | 40,555 | 0,107 | 1,283 |

Согласно значениям параметра θ_s , наибольшее количество воды среди исходных горизонтов вмещает в себя торф и смесь, а наименьшее - песок (таблица 1). В результате 4-летнего функционирования в гор. Апах всех вариантов данный показатель уменьшился. Исключение составил гор. Апах варианта 2 (слоистой конструкции, 0-6 см). Отметим, что значения параметра α уменьшились для всех гор. Апах всех вариантов в результате функционирования. По физическому смыслу это означает увеличение величины давления входа воздуха в почву, что обусловлено усложнением его структурной организации. Действительно, в предыдущей работе авторов показано визуально выделяемое увеличение количества мелких агрегатов на фоне роста крупных пор и полостей (Сусленкова 2018).

Для численного подтверждения трансформации порового пространства были рассчитаны распределения пор по размерам (таблица 2). По сравнению с исходными вариантами к 2016 г количество влагосохраняющих пор в гор. Апах контрольного варианта и смеси варианта 3 снизилось, причем в гор. Апах наблюдается увеличение влагопроводящих пор. Обратная картина обнаружена в поверхностном гор. Апах слоистой конструкции, где количество влагопроводящих пор уменьшается при увеличении влагосохраняющих и остаточных пор, что обусловлено с вовлечением в его состав фрагментов подстилающего торфа. В торфяном же слое изменение порового пространства связано с увеличением объема макропор и снижением объема микропор. Это согласуется с данными, полученными методом сканирующей электронной микроскопии (Сусленкова, 2018), показавшими появление



крупных полостей и пор. Подобные результаты были обнаружены Касини (Casini, 2012), в которой представлены результаты по формированию агрегатов из микроагрегатов, ведущее к росту объема межагрегатных пор и полостей.

Таблица 2. Распределение пор по размерам (%)

| | | Влагопроводящие, Влагосохраняющие, Остаточные, >50 мкм 50-0,2 мкм <0,2 мкм | | | |
|---------|-----------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | <u>медиана</u> <u>диапазон</u> | | | |
| 2012 г. | исходные | Апах | <u>61,5</u> 61,5-70,8 | <u>28</u> 17,8-28,3 | <u>10,2</u> 9-10,5 |
| | | Смесь | <u>26,2</u> 20,8-37,2 | <u>60,1</u> 50,1-65,3 | <u>13,7</u> 12,7-13,9 |
| | | Торф | <u>43,8</u> 42-45 | <u>39</u> 38,3-40,8 | <u>17,2</u> 16,7-17,2 |
| | | Песок | <u>74,8</u> 72,1-75,3 | <u>22,8</u> 22-25,2 | <u>2,7</u> 2,4-2,7 |
| | | | Апах 0-6 см | <u>62,8</u> 62,2-65,2 | <u>25,1</u> 24,3-26,5 |
| 2016 | Вариант 1 | Апах 6-12 см | <u>62,8</u> 61,8-63,6 | <u>26,4</u> 25,7-27 | <u>10,8</u> 10,7-1,2 |
| | | Апах 12-18 см | <u>61,6</u> 61,6-61,6 | <u>27,7</u> 27,6-27,9 | <u>10,7</u> 10,5-10,8 |
| | | Апах 18-24 см | <u>65,4</u> 65,1-65,5 | <u>24,1</u> 24-24,4 | <u>10,5</u> 10,5-10,5 |
| | | Апах 0-6 см | <u>52,1</u> 50,8-55,6 | <u>32,8</u> 31,5-34,4 | <u>13,2</u> 12,9-13,5 |
| | | Торф 6-12 см | <u>47,3</u> 36,1-47,3 | <u>43,7</u> 33,7-55,3 | <u>9</u> 7,8-10,6 |
| | Вариант 2 | Песок 12-18 см | <u>68,5</u> 65,5-71,2 | <u>31,5</u> 28,8-34,5 | <u>0,02</u> 0,02-0,02 |
| | | Апах 18-24 см | <u>60,6</u> 60,3-61 | <u>28,9</u> 28,6-29 | <u>10,5</u> 10,4-10,7 |
| | | Смесь 0-6 см | <u>59,2</u> 57,5-68,5 | <u>29,8</u> 23,9-35 | <u>7,6</u> 7,5-7,6 |
| | | Смесь 6-12 см | <u>58,1</u> 58,1-58,2 | <u>34,5</u> 34,4-34,5 | <u>7,4</u> 7,4-7,4 |
| | Вариант 3 | Смесь 12-18 см | <u>50,1</u> 49,2-51 | <u>39,2</u> 38,3-40,1 | <u>10,7</u> 10,7-10,7 |
| | | Апах 18-24 см | <u>63,1</u> 62,8-63,2 | <u>10,7</u> 10,7-10,7 | <u>9,7</u> 9,7-9,7 |

Выводы

Исследование трансформации водоудерживающей способности в 4-летнем полевом эксперименте показало ее увеличение в гор. Апах, подстилаемом торфяным слоем, на фоне его снижения в нижележащем торфе. В варианте 3 наблюдается резкое снижение данной характеристики в поверхностных слоях смешанного субстрата, форма кривых стала более пологой и схожей с кривыми гор. Апах.



Произошла трансформация порового пространства всех вариантов урбаноземов. Наибольшее изменение наблюдается в 2-м варианте: в поверхностном гор. Апах слоистой конструкции отмечается уменьшение влагопроводящих пор с 62% до 52% на фоне увеличения содержания влагосохраняющих и остаточных пор с 28% до 33% и с 10 до 13%, соответственно. В слое торфа в результате 4-х лет функционирования произошло образование иной пространственной организации порового пространства: снизилось количество остаточных пор и увеличилось влагопроводящих (с 44 до 47%) и влагосохраняющих (с 39 до 44%) пор. Это нашло свое отражение в изменении его функциональных характеристик – произошло уменьшении водоудерживающей способности данного слоя.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проекты № 19-04-01298).

Литература

1. Воронин А.Д. (1984) Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.
2. А.М.Глобус. (1987) Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат.. 428 с.
3. М.М.Suslenkova, A.B.Umarova, M.A.Butylkina (2018). Microstructure of soils of different geneses and its transformation in constructozems of Moscow// *Eurasian Soil Science*, Vol. 51, №10. p. 1220-1228 doi: 10.1134/S1064229318100125
4. A.B.Umarova, E.V.Shein, N.S.Kukharuk (2014). Soil water retention curve of agrogray soils: Influence of anisotropy and the scaling factor// *Eurasian Soil Science*, Vol 47, №12. С.1238-1244 doi: 10.1134/S1064229314120096
5. Е.В.Шейн, Л.О. Карпачевский. (2007). Теории и методы физики почв.//М., Издательство «Гриф и К», с. 616
6. E. V. Shein, E. B. Skvortsova, A. V. Dembovetskii, K. N. Abrosimov, L. I. Il'in and N. A. Shnyrev. (2016). Pore-Size Distribution in Loamy Soils: A Comparison between Microtomographic and Capillarimetric Determination Methods// *Eurasian Soil Science*, №3, с. 344-354 doi: 10.7868/S0032180X16030096
7. Е. Е.В. Шейн. (2005) Курс физики почв.//М., МГУ, с. 430
8. E.Birle, D.Heyer, N. Vogt (2008). Influence of the initial water content and dry density on the soil–water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay. *Acta Geotechnica* (2008) 3, 191–200. DOI 10.1007/s11440-008-0059-y
9. F.Casini, J.Vaunat, E.Romero, A.Desideri (2012). Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt. *Acta Geotechnica*, 7, 139–150 DOI 10.1007/s11440-012-0159-6
10. Y. Mualem. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.



УДК631.4

СОСТАВ И СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ТЕМНОГУМУСОВОЙ ПОЧВЫ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ, РАЗВИТОЙ НА ОТЛОЖЕНИЯХ ТРИАСА

Тюгай З.¹, Иванов А.В.¹, Шваров А.П.¹, Бутылкина М.А.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
zemfira53@yandex.ru

THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF THE SOLID PHASE OF UMBRISOLS DEVELOPED ON
ELUVIUM TRIASSIC SEDIMENTS OF THE KOSTROMA REGION.

Tyugai Z, Ivanov A.V., Shvarov A.P, Butylkina M.A.
Soil Science Faculty, Moscow State University, Russia

Annotation: The solid phase of umbrisols formed on the Triassic clay deposits on the slopes of the Severnye Uvaly in the Kostroma region was studied. Their favorable agrophysical properties are determined, which is associated with a high content of organic matter in the soil, which has a residual hydromorphic nature due to the territory in the Holocene.

Введение

Костромская область, особенно ее восточная часть, представляет собой территорию со сложной историей формирования рельефа и отложений, служащих почвообразующими породами. Число публикаций по характеристике почв Костромской области ограничено. Практически не изученными в почвенном отношении остаются северная и северо-восточная части территории области в пределах южных склонов Северных Увалов. Между тем, эта территория представляет значительный интерес. Здесь на фоне доминирующих по площади Al-Fe гумусовых подзолов распространены темногумусовые остаточно-гидроморфные почвы. Они формируются на приподнятых дренированных поверхностях склонов, сложенных выходами на поверхность древних отложений, в наибольшей мере триаса. Это связано с длительной и сложной историей формирования рельефа и состава почвообразующих пород на территории Северных Увалов и прилегающей к ней с юга части Ветлужско-Унженского междуречья. Северные Увалы представляют собой т.н. называемую наложенную или возрожденную морфоструктуру (Кобозев Н.С., Хабаков А.В., 1931; Спиридонов А.И., 1978). История ее образования включает в себя неоднократные циклы поднятия и денудации, что способствовало выходу на поверхность древних отложений, главным образом триасового возраста. Формирование этих почв связано с выходом на поверхность тяжелых по гранулометрическому составу отложений триаса. (Чижикова, 2010).

Задача наших исследований изучить состав и свойства твердой фазы исследуемых почв.

Объекты и методы

Объектом изучения послужил разрез темногумусовой почвы, заложенный в Пыщугском районе в 2-х км от с. Талицы и в 600 м на восток от шоссе Пыщуг-Никольское. Разрез приурочен к плоской приводораздельной части увалистого повышения на пологом склоне Северных Увалов. Растительность представлена ельником разнотравных в возрасте около 100 лет с единичной примесью березы, сосны и обильным подростом ели, рябины и орешника. В напочвенном покрове доминирует земляника, костяника, копытень, папоротник, хвощ лесной, зеленые мхи.

Описание разреза:



Подстилка 0-10см –, влажный. темно - серо-бурая подстилка, рыхлая, густо пронизана корнями

AU 10-25 см - влажный черно-бурый. пронизан густо корнями. Мелко-порошистой структуры, есть включения углистых частиц, много растительных остатков, переход четкий по цвету и плотности, граница волнистая.

C1 25-5 - влажный, бурый, структура мелко-ореховатая, плотнее предыдущего горизонта, переход по цвету и сложению.

C2 50-70 см - влажный неоднородный по окраске, кирпично-красный с белесыми включениями, плотный, переход по цвету, граница ровная.

Cg 70-100 влажный, палевый с краплениями кирпично-красного цвета, плотный, бесструктурный

Почва темногумусовая, оглеенная на глинистых отложениях.

Полевые и лабораторные исследования физических и физико-химических свойств почв проводили как общепринятыми в физике почв методами, так и с привлечением новых инструментальных методов исследования. Так гранулометрический состав почв определяли методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3000,

Агрегатный состав почв на виброгрохоте, содержание С органического вещества определяли на экспресс-анализаторе на углерод АН-7529. (Шеин) Остальные физико-химические анализы проводили по общепринятым в физике почв методикам (Вадюнина, Корчагина, 1986, Теории и методы физики почв, 2007)

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены данные по гранулометрическому составу исследованной темногумусовой почвы. По классификации Н.А. Качинского исследованная почва относится к суглинку тяжелому, пылеватому.

Таблица 1. Гранулометрический состав темногумусовой почвы, %

| Глубина, в см | Размер фракций в мм, и их содержание в % | | | | | | |
|------------------|--|-----------|-----------|------------------|-----------------|--------|------|
| | 1-0,25 | 0,25-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01- 0,005-- | 0,005- 0,001 | <0.001 | 0.01 |
| 10-20 | 0.7 | 12.4 | 36.6 | 17.1 | 28.1 | 5.1 | 50.3 |
| 30-40 | 3.9 | 6.0 | 27.6 | 18.4 | 36.4 | 7.7 | 62.5 |
| 50-60 | 3.1 | 6.8 | 29.3 | 18.6 | 34.3 | 7.9 | 60.8 |
| 70-80 | 0.5 | 3.2 | 23.3 | 20.5 | 43.9 | 8.6 | 73.0 |
| 80-90 | 0.6 | 4.9 | 27.8 | 19.5 | 40.1 | 7.1 | 66.7 |
| 90-100 | 0.2 | 4.5 | 32.7 | 19.9 | 36.8 | 5.9 | 62.6 |

Фракция мельче 0,01мм составляет 50-70%, преобладающими фракциями являются фракции крупной (23-37%) и мелкой пыли (28-44%).

Обращает на себя внимание небольшое содержание илистой фракции. Более низкое содержание илистой фракции при определении гранулометрического состава методом лазерной дифрактометрии по сравнению с пипет-методом Н.А. Качинского отмечают многие исследователи.

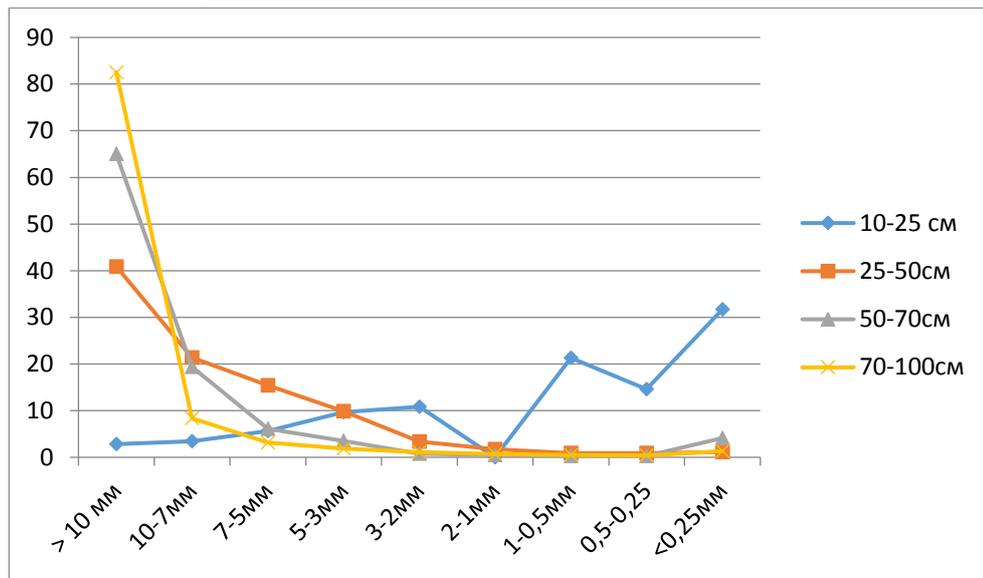


Рис. 1. Агрегатный состав (сухое просеивание, содержание фракций в %)

Агрегатный состав темногогумусовой почвы (рис.1) в верхнем слое 0-50 см отличный. Содержание агрономически ценных агрегатов составляет > 60%. В составе водопрочных агрегатов присутствуют агрегаты всех размеров и > 5 мм, 5-3, 3-2 мм. (рис. 2).

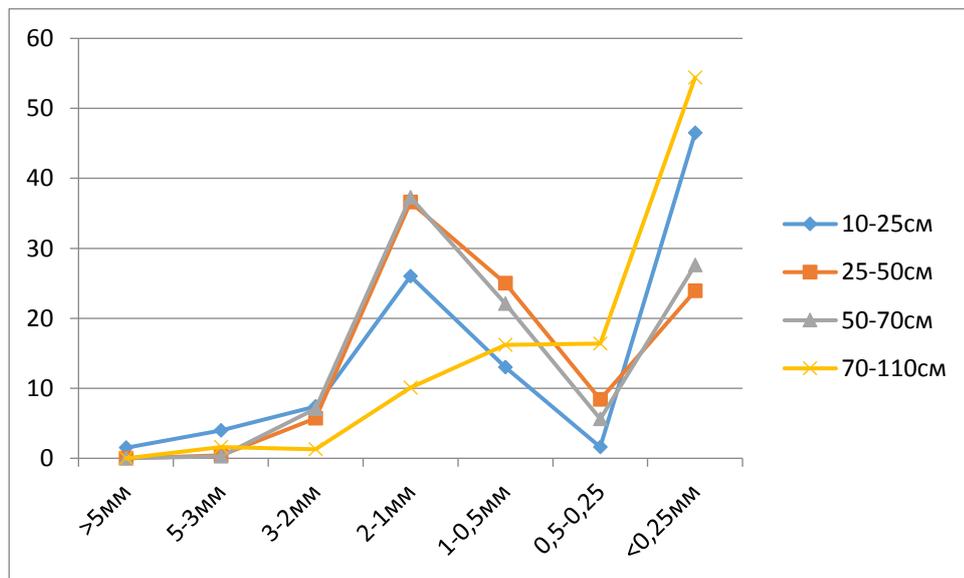


Рис. 2. Содержание водопрочных агрегатов в % (мокрое просеивание)

Такое отличное агрегатное состояние связано с особенностями почвообразующей породы, на которых сформировалась темногогумусовая почва, и с необычно высоким содержанием органического вещества в верхнем горизонте – 14,3-17,7% (табл. 2). Последнее связано с болотной природой в прошлом органического вещества этих почв (Травникова, 2014), что также подтверждают установленные признаки гидроморфизма этой почвы (Иванов и др.) и дает основание отнести ее к остаточной гидроморфной (с учетом непрерывного поднятия территории в голоцене).



Н.П. Чижикова (2010) отмечает, что почвы, развитые в пределах элювия отложений триасового возраста, характеризуются резким преобладанием минералов смектитовой группы в илистой фракции. При этом в пылеватых фракциях доминирующей становится сумма калиевых полевых шпатов и плагиоклазов. Фракции > 0.01 мм также характеризуются повышенным содержанием полевых шпатов. Перечисленные минералы содержат высокие доли элементов минерального питания растений, что свидетельствует о плодородии почв.

Таблица 2. Физические и физико-химические свойства темногумусовой почвы

| Глубина, в см | Влажность, в% | Плотность сложения г-см ³ | Фильтрация см-мин | pH водный | pH солевой | C орг. в% |
|---------------|---------------|--------------------------------------|-------------------|-----------|------------|-----------|
| 0-10 | 94,5 | 0,24 | провальная | 6,3 | 5,7 | 14,3 |
| 10-20 | 52,6 | 0,40 | 5,5 | 6,3 | 5,5 | 17,7 |
| 20-30 | 16,3 | 1,11 | 3,1 | 6,5 | 5,9 | 8,5 |
| 30-40 | 17,9 | 1,31 | 3,0 | 6,6 | 6,5 | 1,6 |
| 40-50 | 17,9 | 1,31 | 2,1 | 6,8 | 5,9 | 0,6 |
| 50-60 | 20,5 | 1,33 | 0,7 | 7,3 | 7,0 | 0,3 |
| 60-70 | 27,1 | 1,33 | 0,7 | 7,4 | 7,2 | 0,2 |
| 80-90 | 30,5 | 1,33 | 0,5 | 7,4 | 7,4 | 0,2 |
| 90-100 | 30,5 | 1,33 | 0,4 | 7,5 | 7,4 | 0,1 |

По физико-химическим свойствам темногумусовая почва резко отличается от альфегумусовых подзолов (табл. 2). К числу наиболее интересных особенностей исследуемого профиля почвы, несомненно, следует отнести специфику органического вещества и характер его распределения. Темногумусовая почва, наряду со значительной гумусированностью (в слое 0-30 см содержание С орг. вещества – 8,5-17,7 %), имеет близкую к нейтральной реакцию среды (рН водной вытяжки в слое 0-30 см – 6,3 - 6,5). В нижней части профиля она слабощелочная (рН водной вытяжки 6.8-7,5).

Плотность сложения в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте невысокая и составляет 0.24-0.4 г-см³. В нижних горизонтах, где содержание органического вещества резко падает плотность увеличивается и колеблется в пределах 1.1 - 1,33 г-см³. В верхнем слое 0-10 см фильтрация провальная, в слое 20-50 см колеблется от 2- %. см-мин., а в нижних горизонтах резко падает и составляет всего лишь 0,4-,7 см-мин.

Выводы

1. По гранулометрическому составу исследованная темногумусовая почва, сформированная на отложениях триаса, относится к суглинку тяжелому пылеватому (по классификации Н.А. Качинского).
2. Структура почвы на агрегатном уровне характеризуется как отличная и содержит водопрочные агрегаты всех размеров >5мм, 5-3 мм, 3-2мм, 2-1 мм, 1-0,5 мм, 0,5-0,25 мм.
3. Характерной особенностью темногумусовой почвы является мощный органо-аккумулятивный горизонт с высоким содержанием С органического вещества, подстилаемый слабодифференцированной толщей пылеватого суглинка с утяжелением вниз по профилю и с типичными признаками оглеения на глубине 70 см.
4. Тяжелый гранулометрический состав, отличные структурные характеристики темногумусовой почвы при высоком содержании органического вещества



предопределяют значительное плодородие темногумусовой почвы, развитой на отложениях триаса.

Литература

Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Из-во: Агропромиздат, 1986 г.

Иванов А.В., Степанов А.А., А.В. Демянчук. Темногумусовые остаточно-гидроморфные почвы склонов северных увалов, сформированные на глинистых отложениях триаса. Вестник МГУ сер. 17. Почвоведение 2018 № 2 с.

Коллективная монография/под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского Теории и методы физики почв. Из-во «Гриф и К», 2007

Кобозев Н.С., Хабаков А.В. Происхождение Северных Увалов// Зап. Рос. Минералогического общества Ч.IX 1931г. №1

Спиридонов А.И. Геоморфология Европейской части СССР. М. 1978Травникова Л.С. Иванов А.В. Особенности состава органического вещества темногумусовых лесных почв Северо-Востока Костромской области. Вестник Моск. Ун-та сер. 17. Почвоведение 2014 , №2 с. 24-28

Шеин Е.В., Милановский Е, Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В. Практикум по физике твердой фазы почв. Учебное пособие. Рабочая тетрадь Москва 2017 год. с 117.

Чижикова Н.П., Иванов А.В., Кучмар Н.М. Минералогия почв, развитых на отложениях триасового возраста. //Бюл.Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева .2010, 365 с.23-35



УДК631.432

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ: КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ

Тюгай З. Быкова Г.С., Милановский Е.Ю., Дембовецкий А.В., Мешалкина Ю.Л.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
zemfira53@yandex.ru

Tyuga Z.N., Bykova G.S., Milanovskiy E.Yu, Demboveckiy A.V., Meshalkina J.L.
Soil Science Faculty, Moscow State University, Russia

Annotation: Three different methods of sample preparation for the analysis of the soil wettability measured by the sessile drop method on a DSA 100 drop shape analyzer (KRÜSS, GmbH, Germany) were tested: a method of applying a sample of soil on an adhesive tape, pressing a soil into a tablet, a method of applying a sample in the form of a 1-2% suspension on glass.

Введение

Поверхностные явления, играющие в почвах ведущую роль, имеют большое практическое значение. А.Д. Воронин отмечал, что все свойства почв и протекающие в них процессы прямо или косвенно в той или иной степени связаны с поверхностными явлениями (Воронин, 1975). Он писал, что «совместное изучение геометрии, энергетики и свойств межфазных поверхностей раздела, состава и энергетики почвенных растворов, а также искусственно вносимых в них химических веществ, наряду с микроморфологическими исследованиями организации элементарных почвенных частиц, дает возможность построить реальные модели почвенных агрегатов и связать поверхностные явления с основными макроскопическими свойствами почв, найти пути их направленного изменения, улучшения и оптимизации». Он отмечал, что «изучение поверхностных явлений в почве – это в сущности, изучение процессов и свойств почв и управление ими на молекулярном уровне» (Воронин, 1975).

Известно, что большинство процессов взаимодействия почвенных частиц с внешней средой происходит через посредство воды, всегда окружающей эти частицы в природных условиях. Учитывая этот факт А.Д. Воронин подчеркивал, что основным инструментом измерения величины и качества полной удельной поверхности почв должна стать молекула воды. Он указывал, что в будущем земледелие будет тесно связано с активными химическими и физическими воздействиями на процессы, протекающие на межфазных поверхностях раздела. Одним из самых распространенных в природе явлений, протекающих на межфазных поверхностях раздела, является смачиваемость почвы. Поэтому понятен интерес исследователей к изучению процесса смачивания. С появлением новых приборов, таких как прибор для анализа формы капли DSA 100 (KRÜSS, GmbH, Германия), в литературе появилось большое количество работ, посвященных определению краевого угла смачивания (КУС) в таких пористых веществах как почва (Bachmann и др., 2000; Beatty и Smith, 2010; Diehl и Schaumann, 2007; Leelamanie и др. 2008; Shang и др., 2008).

Известно, что твердая фаза почвы состоит из трех составляющих: минеральной части, органического веществ и органо-минеральных соединений, образующихся в результате кислотного гидролиза силикатного материала гидрофильными продуктами гумификации органического вещества. Минеральная составляющая почвы характеризуется гидрофильными свойствами; КУС составляет меньше 90°. Органическое вещество почвы характеризуется амфифильными свойствами и является ведущим фактором, определяющим



смачиваемость твердой фазы почвы (Милановский, 2009; Kleber и др., 2007; Tyugai и Milanovskiy, 2014).

Помимо свойств твердой фазы, определяющих смачиваемость образца, существуют и другие факторы, которые нужно учитывать при определении КУС, а именно особенности пробоподготовки образца. Поэтому сравнительный анализ экспериментальных данных, имеющих в литературе, не всегда возможен, так как величины КУС образцов зависят от методики подготовки образцов к анализу и условий проведения съемки.

Цель нашей работы – исследовать влияние разных способов подготовки образца почвы к анализу на величины КУС, измеренные методом статической посаженной капли с использованием прибора для анализа формы капли DSA 100 (KRÜSS, GmbH, Германия).

Объекты и методы

Объектами исследования были: чернозем типичный мощный гор. А (0-20см) целина и А пах.(0-20см) -пашня (Курская область, ЦЧЗ им. Алехина), каолинит, и стекло. По гранулометрическому составу в классификации Н.А. Качинского исследованные черноземы относятся к иловато-крупнопылеватым тяжелым суглинкам. Содержание органического вещества в них составляет 4,5 % (целина) и 3,4%.(пашня).

Измерение угла смачивания проводили с помощью системы анализа формы капли DSA 100 (KRÜSS, GmbH, Германия). Система DSA 100 состоит из трех блоков: столика для образца с тремя мобильными осями X, Y, Z; видеокамеры с оптической системой и источником света, а также дозирующей системы, которая контролируется специальной программой. Прибор позволяет измерять КУС как статической, так и динамической капли. В основе прямого измерения КУС лежит следующая схема: образцом иглы, выдавливается капля определенного объема, игла опускается вниз, приводя каплю в соприкосновение с измеряемой поверхностью. Затем игла поднимается, а капля остается на поверхности образца. Весь процесс регистрируется видеокамерой в режиме макросъемки. С помощью программного обеспечения анализируется форма капли и рассчитывается КУС между каплей и поверхностью, на которую она посажена. Мы использовали деаэрированную дистиллированную воду, объем капли – 1,5 мкл. Скорость подачи капли – 200 мкл/мин.

Было опробовано три разных способа подготовки образцов.

Метод нанесения образца почвы на скотч (далее- скотч). Исследуемый образец почвы отделялся от корней и других растительных остатков и камней, растирался пестиком с резиновым наконечником, просеивался через сито < 0,25мм. Просеянные образцы помещались на 24 часа в сушильный шкаф при температуре 45-50°. На предметные стекла наклеивались кусочки двусторонней клейкой ленты (приблизительно 0,5x0,5 см). На клейкий слой ленты наносилась ровным слоем подготовленная почва и аккуратно придавливалась другим предметным стеклом с грузом 300 мг в течении 1 минуты. Не приклеившаяся почва аккуратно стряхивалась. Для получения максимально ровного слоя образец наносился и стряхивался несколько раз.

Метод нанесения 1-2% суспензии на стекло (далее- суспензия). Предметные стекла очищались с помощью ацетона и смеси серной и соляной кислот, и прогревались в течении 10-12 часов при температуре 105°. Капли исследуемой 1-2% суспензии наносились на чистые стекла, просушенные в течении 10-12 часов. Объем капли 2-3 мкл. После чего стекла с каплями суспензий оставались на двое суток сушиться при температуре 20°, а затем они помещались в сушильный шкаф, нагретый до 105° еще на 10-12 часов.



Метод прессования почвы в таблетку (далее- таблетка). Почву, растертую резиновым пестиком и просеянную через сито 0, 25 мм, спрессовывали в таблетку. Давление пресса $P=100$ bar, экспозиция = 1 мин. Таблетки высушивались при 45° в течении 24 часов.

Обработка данных производилась в программной среде R. Все опыты выполнялись в повторностях. Распределения были охарактеризованы графиками, называемыми «коробочки с усиками», где коробочкой показаны верхний и нижний квартили, точкой внутри коробочки отмечено положение медианы, а усами – минимум и максимум. Точками, выходящими за пределы усов показаны выбросы. Все статические гипотезы проверялись с уровнем значимости 0,05. Для сравнения средних изменений КУС во времени при нагревании образцов стекла и чернозема, а также разных способов пробоподготовки для каолинита и чернозема был использован непараметрический критерий Крускала-Уоллиса.

Результаты и обсуждение

При подборе методик нами учитывались разные факторы, влияющие на КУС. Несомненно, на величину КУС влияет содержание адсорбированной влаги в образце. Хотя прямая зависимость между содержанием влажности и величиной КУС не прослеживалась, в работе Шенга с соавторами (Shang и др., 2010) отмечалось, что КУС достигает своего минимального значения при 100 % относительной влажности окружающей среды.

На рис. 1 и 2 представлены статистики распределения КУС чернозема (пашня) и стекла в зависимости от продолжительности нагрева образца.

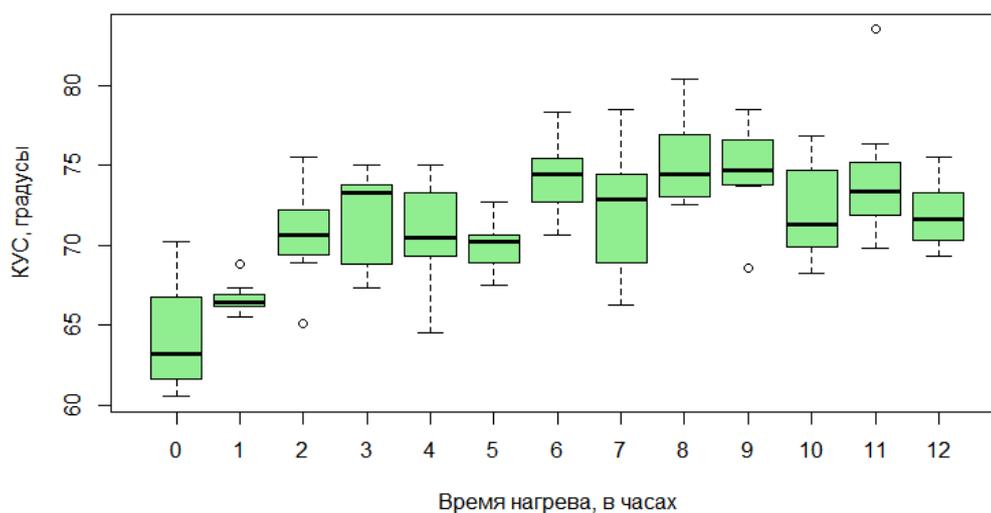


Рис.1. Статистики распределения КУС (в градусах) стекла от времени нагрева (повторность 10)

Нагревание стекла в течение 12 часов дает значимо разные результаты в течение первых двух часов нагревания, далее значения КУС значимо не различаются. Несколько иначе ведет себя чернозем типичный мощный (пашня). Значимые различия оказались только между вариантом 1 и 8 часов нагревания. Далее при нагревании более 8 часов значения КУС у чернозема типичного не изменяются. Это, видимо, связано с тем, что в первые часы нагрева образца при температуре 105° испаряется основная масса гигроскопической влаги, а по истечении 8 часов нагрева испаряется оставшаяся адсорбированная влага. Полученные данные дают основание рекомендовать перед съемкой КУС почв прогревать их при температуре 105° более 8 часов.

Сравнение данных измерения КУС, полученных на образцах каолинита и чернозема типичного мощного (целина) при разных способах подготовки образца к анализу (рис. 3)



показали, что все три опробованных метода подготовки (таблетка, суспензия и скотч) между собой достоверно различаются.

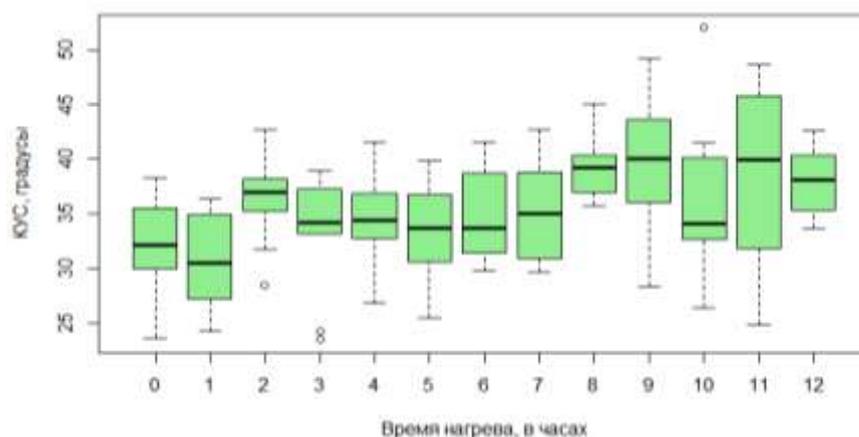


Рис. 2. Статистики распределения КУС (в градусах) чернозема типичного мощного (пашня) от времени нагрева образца (повторность 10)

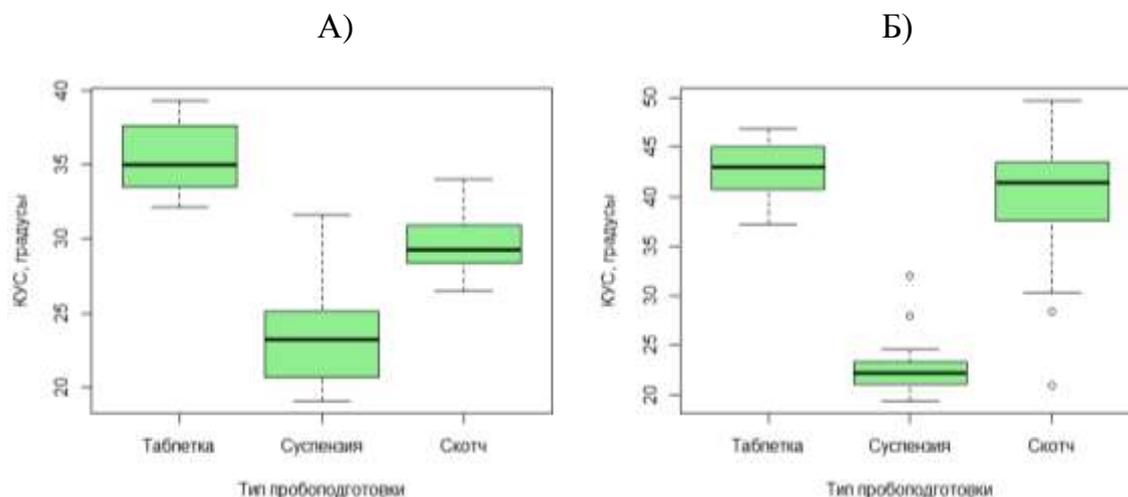


Рис. 3. Статистики распределения КУС (повторность 30) при разных методах пробоподготовки: таблетка, суспензия, скотч. А)– каолинит, Б) – чернозем типичный мощный (целина)

Если сравнивать разные образцы, то каждый метод показывает разные абсолютные значения, но значения КУС меняются относительно одинаково по методам, увеличиваясь или уменьшаясь. Наиболее низкие величины КУС получены при нанесении образца на стекло в виде суспензии. Наиболее высокие значения КУС отмечаются при прессовании образца в таблетку, а значения для образцов, нанесенных на скотч, занимают среднее положение. Наименьший разброс данных дают метод суспензий и метод таблеток. Однако метод суспензий подходит не для всех образцов, дает заниженные данные по сравнению с другими методами и трудоемок. Например, образцы, содержащие в большом количестве разбухающие минералы группы монтмориллонита, не удастся подготовить методом суспензий. Метод таблеток дает небольшой разброс данных, но следует учитывать, что свойства поверхности спрессованных образцов существенно отличаются от свойств порошков, то есть метод таблетки значительно меняет свойства самого образца. Определение КУС методом нанесения



образца на скотч дает наибольший разброс данных, хотя этот метод наиболее часто встречается в литературе.

Выводы

Исследования показали, что определение КУС методом статической посаженной капли зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать при подготовке образца и выбора метода: геометрии поверхности образца, размера частиц, температуры и времени высушивания, минералогии образца, влажности и др. Полученные данные дают основание рекомендовать перед съемкой КУС почв прогревать их при температуре 105° более 8 часов. Все три опробованные методы подготовки образца к анализу: метод прессования образца в таблетку, метод нанесения 1-2 % суспензии на стекло, метод нанесения образца на скотч дают разные результаты измерения КУС. Сравнить результаты измерений возможно только при одинаковой подготовке образцов. Пока затруднительно определить, какой метод является более предпочтительным. Выбор соответствующего метода будет во многом зависеть от физико-химических свойств объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин А.Д. Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки, 1975. №12. С.7-15.
2. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М. ГЕОС, 2009. 186 с.
3. Bachmann J., Ellies A., Hartge K. H. Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency // Journal of Hydrology. 2000. V.231-232. С. 66-75.
4. Beatty S. M., Smith J. E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils // Journal of Hydrology. 2010. V. 391. С. 97-108.
5. Diehl D., Schaumann G. E. The nature of wetting on urban soil samples: wetting kinetics and evaporation assessed from sessile drop shape // Hydrological Processes. 2007. V 17 I. 21. С. 2255–2265.
6. Leelamanie D. A. L., Karube J., Yoshida A. Relative humidity effects on contact angle and water drop penetration time of hydrophobized fine sand // Soil Science and Plant Nutrition. 2008. V. 54. С. 695-700.
7. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interaction in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surface// Biogeochem. 2007. 85. С.9-24.
8. Tugai Z., Milanovskiy E. The contact angle of wetting of the solid phase of soil before and after chemical modification // Abstract book 9th International Soil Science Congress on “The Soul of Soil and Civilization” (14-16 October 2014). — Side, Antalya/Turkey Turkey, 2014. — P. 144–144.
9. Shang J., Flurya M., Harsha J. B., Zollars R. L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids // Journal of Colloid and Interface Science. 2008. V. 328. С. 299-307.
10. Shang J., Flurya M., Harsha J. B., Zollars R. L. Contact angles of aluminosilicate clays as affected by relative humidity and exchangeable cations // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. -2010. T.353 №1. С. 1-9



УДК:631.431

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОСНОВНОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВ

Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А.

Факультет почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия,
dkhaydapova@yandex.ru

Annotation: The strengths of the aggregates of hor. A1 of typical virgin chernozem, An arable typical chernozem, and hor. Bca chernozem of typical Kursk region (Haplic Chernozems (Pachic)) in a wide range of humidity using the conical plastometer Rebinder were investigated. It is shown that the strength of the aggregates depends on the forms of moisture content. The dependence of strength on moisture is exponential, the dependence of the strength of aggregates on the pressure of moisture is a power-law character. This study confirms the structural-functional concept of Voronin that the physical state of the soil is the result of the interaction between the solid and liquid phases, and the nature of this interaction depends on the structure of the solid phase and on the content of the liquid phase. Comparison of virgin and arable soils revealed a twofold positive effect of OM on the structural state of the soil. At high humidity, aggregates of virgin soil are more durable than aggregates of arable and aggregates of the lower horizon of the Bca. In the air-dry condition, the strength of arable soil aggregates significantly exceeds the strength of virgin soil aggregates, which indicates degradation processes in arable soil, a decrease in organic matter leads to an increase in interparticle interaction and an increase in the bulkiness of the soil structure.

Введение

А.Д.Воронин (1984) показал, что гидрофизические и связанные с ними механические и реологические свойства почв являются функциями структуры почв, поскольку обусловлены как кривизной поверхности раздела твердой части с жидкой, так и жидкой с газообразной. Эти характеристики зависят от особенностей структуры почв и отражаются в кривых водоудерживания, поэтому последние и можно использовать для определения важнейших агрофизических и гидромелиоративных характеристик [1].

Определение А.Д.Воронина (1984) структуры почв как физического строения вещества почвы, обусловленного размером, формой, количественным соотношением, характером взаимосвязи элементарных почвенных частиц и состоящих из них агрегатов, позволяет вскрыть причины возникновения важных в практическом отношении структурно-функциональных физических свойств почв и определить пути их изменения в заданном направлении. Именно характер взаимосвязи почвенных частиц и их прочность являются интегральным выражением всех свойств компонентов почвенной структуры. Методы реологии почв как науки о деформациях, качестве структурных связей, и их прочности наиболее подходящи для получения количественных закономерностей поведения почвенных структур в зависимости от содержания почвенной влаги и основной гидрофизической характеристики. В связи с этим целью данной работы стало выявление взаимосвязи реологического поведения почв с основной гидрофизической характеристикой. Задачами исследования явились определение прочности почвенных агрегатов размером 3-5 мм, представляющих собой агрегатный уровень структурной организации почв, в широком диапазоне влажности и сопоставление с основными гидрофизическими характеристиками.

Объекты и методы. Объектами исследования явились агрегаты размером 3-5 мм чернозема типичного Курской области Haplic Chernozems (Pachic) (варианты землепользования: степь, с/х пашня). Гранулометрический состав определен



седиментационным методом пипетки, органическое вещество на экспресс-анализаторе, данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав и содержание органического углерода

| Варианты | Горизонт | Сорг., % | Гранулометрический состав (%) | | | | | |
|-------------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------------|--------------|
| | | | >0.25 мм | 0.25- 0.05 мм | 0.05- 0.01 мм | 0.01- 0.005 мм | 0.005- 0.001 мм | <0.001 мм |
| Чернозем типичный (целина) | A'(10-15) | 4,84 | 0,02 | 6,36 | 52,16 | 11,06 | 13,21 | 16,76 |
| Чернозем типичный (пашня) | A' (10-15) | 2,94 | нет | 4,1 | 47,2 | 11,8 | 13,9 | 22,7 |
| | Вса(140- 145) | 2,05 | нет | 3,2 | 41,3 | 13,9 | 15,5 | 25,9 |

Прочность агрегатов определяли коническим пластометром Ребиндера [3,4]. Агрегаты предварительно капиллярно увлажняли на керамической плитке в течение суток. Влажность агрегатов после суточного капиллярного увлажнения будем называть капиллярной влагоемкостью (КВ). После определения прочности максимально увлажненных агрегатов, агрегаты перекладывали на стеклянную поверхность и высушивали при комнатной температуре. Прочность и влажность агрегатов определяли через каждые 15 минут высушивания. Повторность определения 10-кратная. Ребиндер предлагал для определения прочности пластичных тел применять коэффициент 1.108, который представляет поверхность конуса, контактирующего с материалом; в случае с твердыми телами, он предлагал проводить расчет коэффициента исходя из проекции площади круга в основании конуса, в этом случае наши расчеты показали коэффициент равный 4.4 [3,4]. Определение момента перехода пластичного поведения почвенных агрегатов в упруго-хрупкое по мере высыхания проводили по точке перелома зависимости температуры сушки почвенного образца от влажности [5]. Основные гидрофизические характеристики были получены методом центрифугирования (в модификации Смагина).

Обсуждение результатов

На рис.1 представлены кривые зависимости прочности агрегатов от влажности (А) и (Б) увеличенный масштаб нижней части кривых. Зависимость прочности от влажности имеет экспоненциальный характер. Как видно наибольшее количество влаги поглотили агрегаты целинного чернозема и они же отличаются большей прочностью в отличие от агрегатов пахотного поля и горизонта Вса. Агрегаты гор.Вса при большой влажности характеризуются наименьшей прочностью. Очевидно, в условии большого содержания влаги, органическое вещество чернозема целинного удерживает почвенные частицы в связанном состоянии, обеспечивая значительную водопрочность, в то время как чернозем пахотный из-за 50% потери ОВ уже не способен в такой же мере обеспечивать устойчивость структуры, как чернозем целинный. Наименьшей устойчивостью характеризуются агрегаты гор Вса. По мере уменьшения влажности наблюдается рост прочности агрегатов.

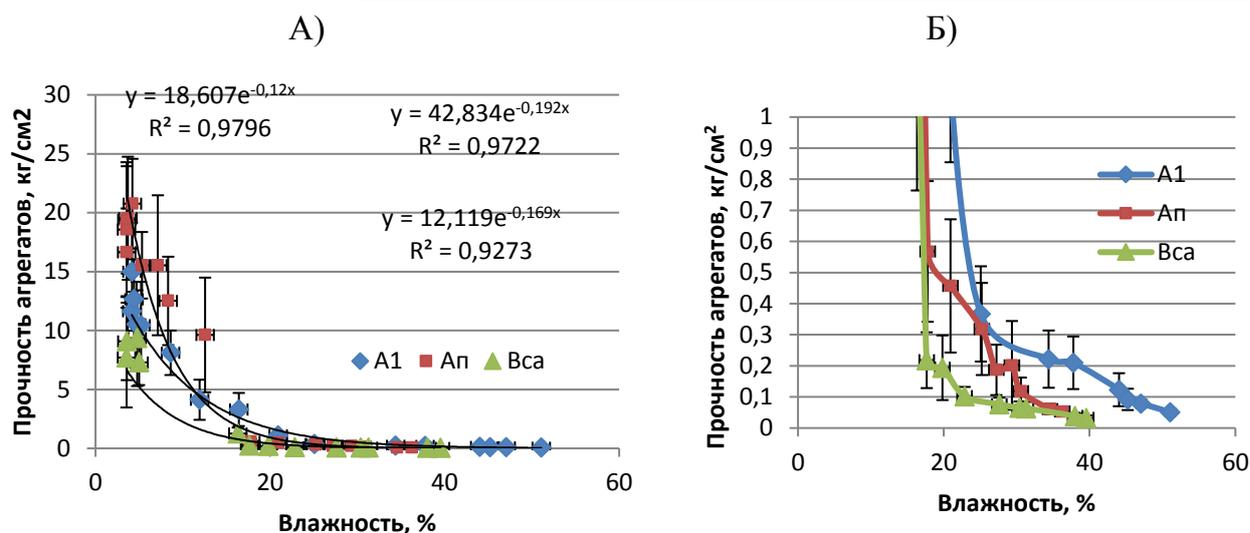


Рис.1. Зависимость прочности агрегатов от влажности - (А), (Б)- увеличенный масштаб нижней части кривых.

Резкий перегиб кривой чернозема целинного наблюдается в области влажности 25%, пахотного и горизонта Bca - 16-17% влажности [5]. Эта влажность соответствует влажности предела пластичности (ПП) или влажности разрыва капиллярной связи (ВРК). Существование подобных перегибов в увеличении прочности глин в зависимости от влажности отмечали Соколов и Осипов (1977). Они связывали их с различным влиянием воды на прочность глин. В диапазоне содержания влаги от КВ до ПП прочность возрастает постепенно, характер зависимости – линейный. Структура при этом имеет коагуляционный тип, обусловленный дальнедействующими силами. При дальнейшем уменьшении влаги, наблюдается резкий рост прочности, вероятно здесь увеличивается стягивающая сила тонких капилляров, система постепенно переходит из коагуляционной в конденсационный тип структуры. При иссушении до приблизительно 4% влажности происходит максимальное упрочнение структуры, контакты в таких системах обусловлены в основном ионно-электростатическими связями. В агрегатах Ap наблюдается более резкое возрастание прочности после влажности разрыва капилляров, прочность агрегатов в воздушно-сухом состоянии достигает 21 кг/см², в то время как в агрегатах целинного чернозема она равна 15 кг/см². Это является признаком деградации почвенной структуры, т.к. приводит к образованию глыбистой структуры, причиной чего послужило уменьшение содержания ОВ. Повышение прочности по мере иссушения агрегатов гор. Bca ниже, чем в агрегатах гумусированных горизонтов, вероятно это связано с повышенным содержанием карбонатов, которые являются причиной образования хорошей микроагрегатной структуры. Микроагрегаты образуют макроагрегаты с хорошей пористой структурой. Таким образом, очевидна связь прочности почвенной структуры с различным содержанием влаги, в связи с этим мы попытались установить зависимость прочности структуры с основной гидрофизической характеристикой. На рисунке 2. представлены зависимости прочности агрегатов от потенциала почвенной влаги.

Как видно из рис.2. зависимость прочности агрегатов от потенциала почвенной влаги имеет степенной характер. С понижением давления почвенной влаги межчастичное взаимодействие увеличивается и увеличивается прочность почвенных агрегатов.

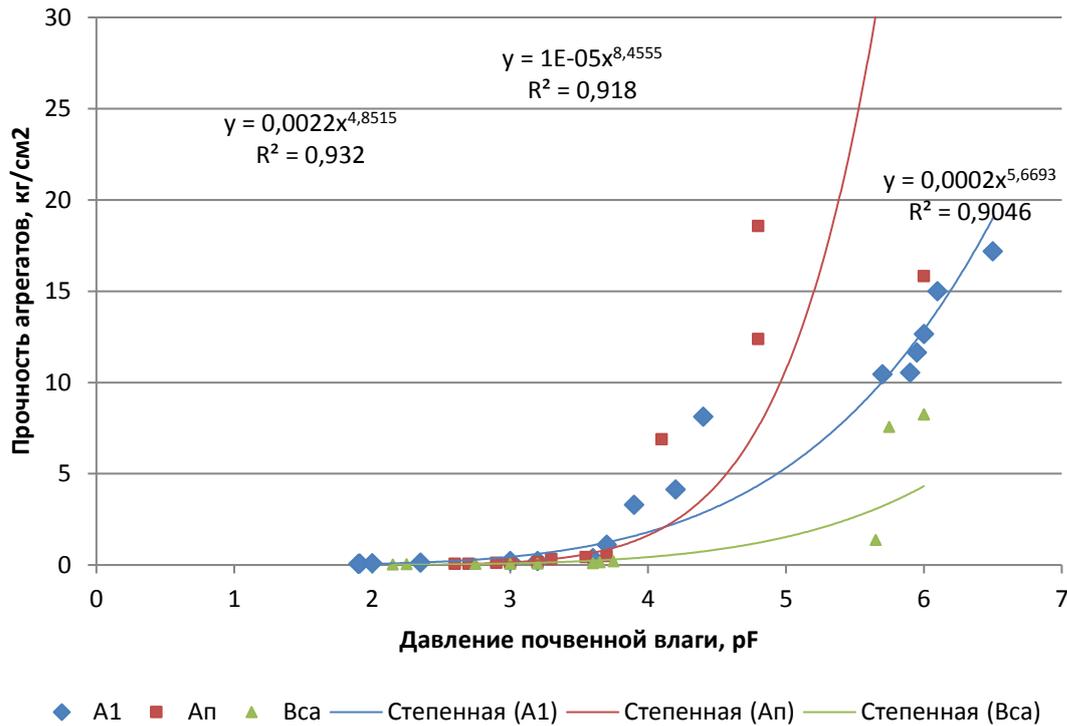


Рис. 2. Зависимости прочности агрегатов от потенциала почвенной влаги.

Выводы

1. Исследование прочности агрегатов в широком диапазоне влажности показало, что прочность агрегатов зависит от форм содержания влаги. Зависимость прочности от влажности имеет экспоненциальный характер, зависимость прочности агрегатов от давления влаги имеет степенной характер. Данное исследование экспериментально подтверждает структурно-функциональную концепцию Воронина о том, что физическое состояние почв – результат взаимодействия твердой и жидкой фазы, а характер этого взаимодействия зависит как от структуры твердой фазы, так и от содержания жидкой фазы.

2. Сравнение целинных почв и пахотных выявило двойное положительное влияние ОВ на структурное состояние почв. При высокой влажности агрегаты целинной почвы более прочны, чем агрегаты пахотной и агрегаты нижнего горизонта Vca. В воздушно-сухом состоянии прочность агрегатов пахотной почвы значительно превышает прочность агрегатов целинной почвы, что говорит о деградиционных процессах в пахотной почве, уменьшение содержания ОВ приводит к повышению межчастичного взаимодействия и увеличению глыбистости почвенной структуры. Небольшая прочность агрегатов Vca в сухом состоянии показывает положительное структурирующее действие карбонатов Ca, которые способствуют образованию пористой структуры почв.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-04-00555 и №18-29-25017\18



Литература

1. *Воронин А.Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М., Изд-во Моск. Ун-та, 1984, 201 с.
2. *Ребиндер П.А., Семенов Н.А.* О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел. // 1949 Докл. АН СССР. т.64. № 6.
3. *П.А.Ребиндер* Конспект общего курса коллоидной химии (по лекциям П.А.Ребиндера составлен доц. К.А.Поспеловой) . М., Изд-во Моск. Ун-та, 1949, с.112
4. *В.Н.Соколов, В.И. Осипов* Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин//Связанная вода в дисперсных системах. Вып 4. М. Изд-во Моск. Ун-та, 1977, с. 4-15
5. *Честнова В.В.* Автореферат кандидатской диссертации «Реологические свойства черноземов типичных Курской области: взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой». М., 2017, с.26



УДК 631.4

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Хан К.Ю., Сон Б.К.

¹Окский экологический фонд, г. Пушкино, e-mail: khan250351@gmail.com

²Институт фундаментальных проблем биологии РАН, Пушкино
[e-mail: bson2015@yandex.ru](mailto:bson2015@yandex.ru)

Annotation: Researches are devoted to the study of the mechanisms of formation of coagulation contacts in soil aggregates. It is shown that the structural component of the disjoining pressure, which is formed in thin layers of water due to the overlapping of boundary layers of water with modified structure fundamentally determines the strength of the structural relationships in the contacts that determine the structure and strength of waterproof aggregates in soils.

В результате проведенных исследований изучен кинетический механизм разрушения структурных связей в глинистых грунтах и агрегатах почв, что позволило определить значения энергетических параметров, характеризующие их долговечность – длительную прочность.

Структура агрегатов – это важнейшее качество почвы. Она является чутким индикатором условий образования и дальнейшего преобразования почвы. Исследование энергетических характеристик структуры агрегатов позволило выяснить природу сил, определяющих образование и разрушение в агрегатах различных типов контактов, и получить информацию о генезисе почв, связанную с энергетикой структурообразования.

Без теоретически обоснованных представлений и экспериментально подтвержденных данных о механизме формирования и разрушения структурных связей в агрегатах почв невозможно с позиций физико-химической теории прочности дисперсных структур количественно оценить энергетические характеристики, определяющие водоустойчивость агрегатной структуры почв. Ниже излагаются теоретические представления о закономерностях разрушения структурных связей в водоустойчивых агрегатах почв, а также экспериментальные данные, характеризующие энергетику водоустойчивости почвенных агрегатов.

Процесс разрушения водоустойчивого агрегата под нагрузкой развивается во времени. Длительность этого процесса согласно уравнению (1) определяется температурой T и величиной активационного барьера разрушения $E = U_0 - \gamma P$ (U_0 – начальная энергия активации равна по величине энергии связи ($u_{св}$) частиц [1]):

$$t = t_0 e^{\frac{U_0 - \gamma P}{kT}} . \quad (1)$$

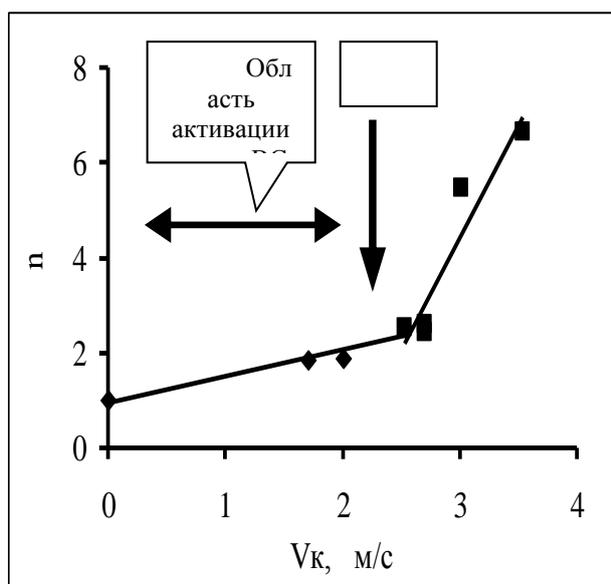
Зависимость (1) позволяет определять величину активационного барьера разрушения E по значениям t , при условии, что процесс разрушения водоустойчивых агрегатов осуществляется при постоянной температуре T , так как в этом случае значение активационного барьера разрушения E однозначно определяется величиной напряжения P .



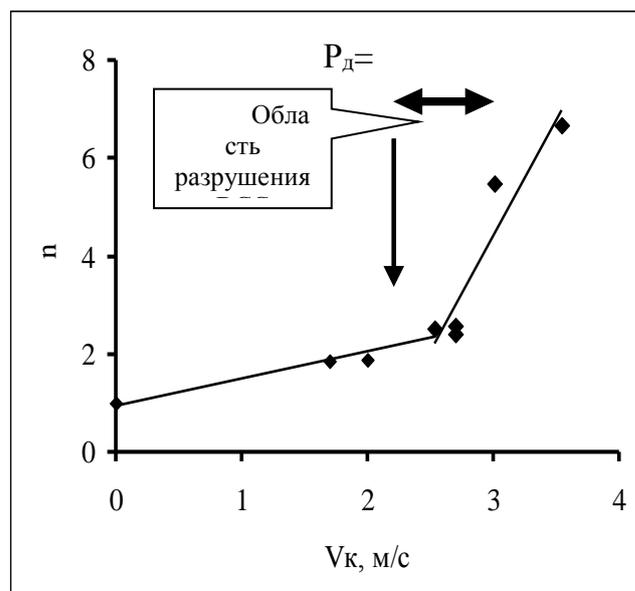
Процесс активации структурных связей начинаются с того момента, как только агрегат оказывается под действием нагрузки. Водоустойчивые структурные связи (ВСС) в агрегатах, находящихся под нагрузкой P_1 ($P_d \geq P_1 \geq 0$), активируются, но не разрушаются ($U_a < E$). Как только величина барьера активации структурных связей под действием нагрузки P_2 ($P_{max} > P_2 > P_d$) преодолевает активационный барьер разрушения ($U_a > E$) агрегат разрушается. P_d – это предельная величина нагрузки, под действием которой все структурные связи в агрегатах находятся в активированном состоянии. При нагрузках P_2 , превышающих величину P_d , активированные структурные связи начинают разрушаться так как преодолевается барьер разрушения активированных водоустойчивых структурных связей (рис.1, 2). Методика экспериментального определения параметров, характеризующих длительную прочность водоустойчивых агрегатов, изложена в работе [4].

Физический смысл предельно допустимого напряжения заключается в том, что величина P_d является количественной характеристикой макроскопической прочности водоустойчивых агрегатов P_c ($P_d = P_c$), разграничивающая область активации от области разрушения активированных водоустойчивых структурных связей. Энергия активации структурных связей U_a предопределяет изменение активационного барьера разрушения E (рис. 1, 2).

На основании экспериментальных данных, характеризующих изменение длительной прочности t в зависимости от нагрузки P в агрегатах различных почв были определены: 1) величина энергии связи между взаимодействующими частицами ($u_{св}$); 2) значение активационного объёма (γ); и 3) константа времени (t_0). Для сравнения вышеперечисленные параметры были определены также в глинистых грунтах нарушенного и ненарушенного сложения [3], а так же в озерно-ледниковой и морской (гжельской) глине естественного сложения [2] (рис.2, табл.). Отметим, что в указанных образцах энергетические параметры, характеризующие длительную прочность глинистых пород, определены авторами данной работы [4].

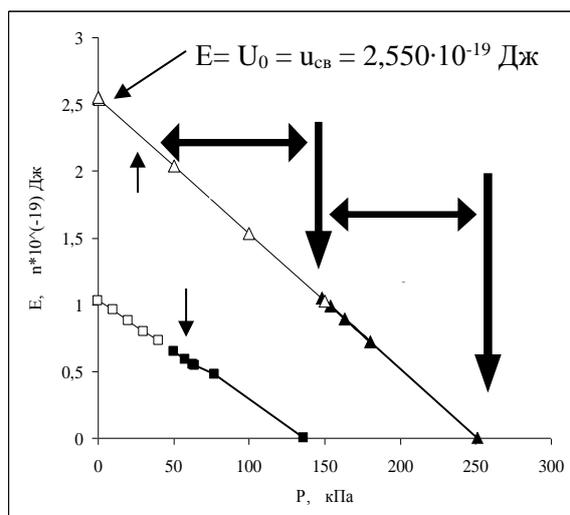


а) зависимость n от разрушающей скорости капель V_k ($D_{ky} = 4,0$ мм)



б) зависимость n от разрушающей скорости капель V_k ($D_{ky} = 6,0$ мм)

Рис. 1. Определение предельно допустимого напряжения P_d для водоустойчивых агрегатов темно-каштановой тяжелосуглинистой почвы (Ростовская обл.)



5 – Морская (гжельская) глина ненарушенного сложения (Псковская обл.)

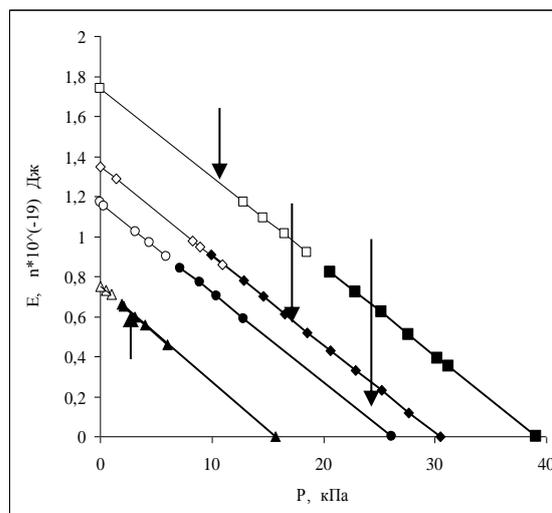
6 – Озерно-ледниковая глина ненарушенного сложения (Московская обл.)

Обозначения:

Δ, \square – область активации структурных связей ($U_a = U_0 - \gamma P_1$; $0 < P_1 < P_d$)

$\blacksquare, \blacktriangle, \bullet$ – область разрушения структурных связей ($U_p = U_0 - \gamma P_2$;

$P_d < P_2 < P_{max}$)



1. - Чернозем типичный тяжелосуглинистый, целина (Курская обл.)

2. - Светло-серая лесная почва (Московская обл.)

3 - Каштановая легкосуглинистая почва, пар (Ростовская обл.)

4 - Суглинок карбонатный ненарушенного сложения (Р.Грузия)

Рис. 2. Изменение активационного барьера E в зависимости от напряжения P (P - создавалось каплями, падающими на поверхность агрегатов с определенной скоростью V_k). Обозначения в тексте.

Константа времени t_0 озерно-ледниковой глины естественного сложения на три порядка отличается от константы времени морской гжельской глины естественного сложения с конденсационно-кристаллизационным, коагуляционным и смешанным типом связи. Величина t_0 для глинистых грунтов нарушенного и ненарушенного сложения, установленная нами, оказалась равной константе времени озерно-ледниковой глины. В агрегатах почв t_0 соответствовала константе времени, определенной для морской гжельской глины.

Константа времени t_0 для исследованных дисперсных структур является устойчивой характеристикой, и она отражает особенности контактных взаимодействий в дисперсных структурах, обусловленных энергетической природой структурных связей. По величине энергии связи ($u_{св}$) глинистые грунты с коагуляционным типом структуры отличается от глинистых грунтов с конденсационно-кристаллизационным, коагуляционным и смешанным типом, а последние - от водостойчивых агрегатов почв.

Мгновенная динамическая нагрузка (P_{max}), определенная на основании количественной интерпретации (рис. 2), оказалась близка по величине макроскопической прочности глинистых грунтов, определенного методом размыва [3]. Максимальная динамическая нагрузка P_{max} , как следует из нашего анализа, характеризует разрушаемость структурных связей при нулевом значении активационного барьера разрушения ($E = U_0 - \gamma P = 0$). При данном уровне динамической нагрузки структурные связи в глинистых породах под действием нагрузки разрушаются сразу (долговечность их практически равна нулю).



Подобное наблюдается при разрушении водным потоком глинистых грунтов, когда скорость его превышает значение допустимой размывающей скорости.

Таблица. 1. Энергетическая характеристика структуры некоторых глинистых грунтов и агрегатов почв

| ид грунта | U_0 (10^{-19} Дж) | t_0 , с | γ (10^{-24} м ³) | Прочность, кПа | | | |
|---|------------------------------|----------------------|--|----------------|-----------|-------|-------|
| | | | | P_d | P_{max} | P_1 | P_2 |
| Глинистый грунт нарушенной структуры ($\rho = 1,67$ г/см ³) | 0,824· | $2,80 \cdot 10^{-3}$ | 7,081· | 2,0 | 11,6 | 13,0 | 63,0 |
| Глинистый грунт нарушенной структуры ($\rho = 1,56$ г/см ³) | 1,058· | $2,80 \cdot 10^{-3}$ | 10,901· | 1,8 | 9,7 | 10,0 | 52,0 |
| Суглинок карбонатный ненарушенной структуры ($\rho = 1,42$ г/см ³) | 0,754 | $2,85 \cdot 10^{-3}$ | 4,830 | 1,9 | 15,6 | 12,0 | 70,0 |
| Озерно-ледниковая глина ($\rho = 1,64$ г/см ³) (Псковская обл.) | 1,030· | $2,89 \cdot 10^{-3}$ | 0,759 | 50,0 | 135,7 | - | - |
| Морская (гжельская) глина ($\rho = 1,66$ г/см ³) (Московская обл.) | 2,550 | $2,47 \cdot 10^{-6}$ | 1,010 | 163,0 | 251,0 | - | - |
| Каштановая легкосуглинистая почва, пар (Ростовская обл.) | 1,170 | $2,50 \cdot 10^{-6}$ | 4,450 | 5,9 | 26,1 | - | - |
| Чернозем типичный тяжелосуглинистый (Курская обл.) | 1,740 | $2,50 \cdot 10^{-6}$ | 4,450 | 18,5 | 39,1 | - | - |

Обозначения: U_0 – начальная энергия активации, при $P = 0$ равна энергии связи частиц в контактах; P_{max} – максимальная динамическая нагрузка, при которой $U_p = U_0 - \gamma P = 0$; капля, создающая такое напряжение, разрушает агрегат при каждом ударе; P_1 – макроскопическая прочность (сцепление) глинистых грунтов, определенная по размыву глинистых грунтов; P_2 – сцепление глинистых грунтов, определенное прибором Н.А. Цытовича. Остальные обозначения прежние.

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснен кинетический механизм разрушения структурных связей в глинистых грунтах и агрегатах почв, что позволило определить значения энергетических параметров (табл.), характеризующие их долговечность – длительную прочность.

Литература:

1. Щукин Е.Д. Физико-химическая теория прочности дисперсных структур и материалов. В кн. Физико-химическая механика природных дисперсных систем. Изд. МГУ, 1985. С.72-90.
2. Королёв В.А. и др. Влияние температуры на длительную прочность глин при трехосном сжатии. В кн. Поверхностные плёнки воды в дисперсных системах. Изд. МГУ 1988. С.266-277.
3. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. Изд. «Колос», 1966. С.178.
4. Хан К.Ю. Энергетическая характеристика водостойчивости почвенных агрегатов. Автореферат докторской диссертации, 2013, С.53.



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ БЕССМЕННЫХ ПАРА И ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО КУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Цветков С.А.¹, Мамонтов В.Г.¹, Билько З.В.¹, Лазарев В.И.²

¹РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация.

²Курский НИИ АПП, пос.Черемушки, Курский р-он, Курская область, Российская Федерация

Annotation: An important factor in the effective use of agricultural land – favorable physical properties of the soil, among which special attention freezes the nature of the soil structure that provides a favorable environment for the growth and development of plants. [1, 2, 3, 4]. A characteristic feature of virgin chernozems is a well-expressed unique granular structure. From other types of soils, they are characterized by a high content of agronomically valuable aggregates, which account for 80-90%, and the fraction of the size of 5...1mm ranges from 40 to 60%.

Характерная особенность целинных черноземов – хорошо выраженная уникальная зернистая структура. От остальных типов почв они отличаются высоким содержанием агрономически ценных агрегатов, на долю которых приходится 80-90%, причем доля фракции размером 5...1мм колеблется от 40 до 60%.

Вовлечение в пашню и длительное использование черноземов сопровождается существенным ухудшением их структурного состояния. Это проявляется в увеличении глубистости и распыленности пахотного слоя, уменьшении содержания фракции агрегатов размером 5... 1 мм до 28...40 %, водостойчивых агрегатов – на 22...35 % и более.

Введение Мероприятия по улучшению агрофизического состояния черноземов разработаны и успешно применяются на практике [4]. Однако в последние десятилетие ситуация обострилась в связи с ориентацией сельскохозпроизводителей на узкую специализацию вплоть до длительного бессменного возделывания одной культуры и недостаточного применения удобрений, особенно органических. Это может привести к еще большему ухудшению структурного состояния черноземов и привести к физической деградации пахотных угодий.

Цель работы - оценка влияния экстенсивного использования пашни на структурное состояние чернозема типичного.

Объектом исследования служил чернозем типичный тяжелосуглинистый. Почвенные образцы отбирали в Центрально-Черноземном государственном биосферном заповеднике им. А.А. Алехина на участке целинной некосимой степи из гумусово-аккумулятивного горизонта А чернозема (слой мощностью 5...25 см) и из пахотного слоя на участке бессменного пара, существующего с 1947 г., где для борьбы с сорняками проводит культивации и периодическую вспашку на глубину 22...24 см, а также на территории Петринского опорного пункта Курского НИИ АПП – в стационарном полевом опыте, существующем с 1964 г., из пахотных горизонтов чернозема типичного в вариантах бессменная озимая пшеница с ежегодным применением $N_{45}P_{60}K_{45}$, размер делянок 296 м².

Результаты исследований показали (табл. 1), что в составе агрегатов целинного чернозема при сухом просеивании преобладают фракции размером 5...3 мм (24,2 %), 3...2 мм (19,1 %) и 2...1 мм (18,3 %). Следующая по значимости фракция - 7... 5 мм, на которую приходится 11,6%. Содержание глыбистых отдельностей (> 10 мм) составило 4,6 %, а фракции < 0,25 мм - 7,3 %. Доля остальных фракций варьировала от 3,5 до 6,4%.



1. Влияние бесменного пара и бесменной озимой пшеницы на агрегатный состав чернозема типичного Курской области

| Высота | Содержание (%) воздушно-сухих агрегатов размером (мм) | | | | | | | | |
|---|---|--------|-------|-------|-------|-------|---------|------------|-------|
| | > 10 | 10...7 | 7...5 | 5...3 | 3...2 | 2...1 | 1...0,5 | 0,5...0,25 | <0,25 |
| Целина | 4,6 | 6,4 | 11,6 | 24,2 | 19,1 | 18,3 | 3,5 | 5,0 | 7,3 |
| Бесменный пар | 43,0 | 16,1 | 11,7 | 11,0 | 5,5 | 6,1 | 2,0 | 1,7 | 2,9 |
| Бесменная озимая пшеница (без удобрений) | 25,5 | 7,8 | 8,5 | 13,5 | 9,1 | 17,8 | 4,3 | 8,6 | 4,9 |
| Бесменная озимая пшеница (N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅) | 28,3 | 8,8 | 7,8 | 10,1 | 7,8 | 18,1 | 4,3 | 8,7 | 6,1 |
| НСPos | 18,2 | 6,0 | 4,6 | 3,9 | 2,2 | 4,6 | 1,6 | 3,8 | 5,0 |

Считается, что агрегаты размером 5...1 мм - наиболее ценны с агрономической точки зрения. В целинном черноземе типичном агрегаты этого размера отчетливо преобладают, содержание их составило 61,6 %. Такая особенность агрегатного состава черноземов неоднократно отмечена в литературе.

Длительное использование чернозема в пашне привело к существенному изменению его структурного состояния, особенно это касается варианта с бесменным паром. В первую очередь следует отметить резкое увеличение доли глыбистых отдельностей (> 10 мм), содержание которых, по сравнению с целинным вариантом, увеличилось более чем в 9 раз и составило 43,0 %. С 6,4 до 16,1% возросло количество агрегатов размером 10...7 мм, тогда как содержание отдельностей размером 5 и менее 1 мм достоверно не изменилось. В то же время агрегатов, имеющих размер от 1 до 5 мм, стало заметно меньше. Доля фракции размером 5...3 мм снизилась на 13,2 %, 3...2 мм – на 13,6%, 2...1 мм – на 12,2%. Общее содержание агрегатов этих наиболее ценных с агрономической точки зрения фракций уменьшилось в 2,7 раза.

Не менее значимые изменения произошли с агрегатным составом чернозема при бесменном возделывании озимой пшеницы. Содержание фракции > 10 мм возросло, хотя и в меньшей степени, чем в варианте с бесменным паром, но все же довольно существенно, - на 20,9%...23,7 %. В то же время количество агрегатов размером 10...7 мм, 7...5 мм и < 2 мм осталось на исходном уровне. Наряду с этим заметные количественные изменения произошли с агрегатами размером от 5 до 2 мм. Доля фракции размером 5...3 мм снизилась на 10,7 %...14,1 %, а фракции 3...2 мм – на 10,0...11,3 %. Под влиянием бесменной озимой пшеницы общее количество агрегатов наиболее ценного размера (5...1 мм) уменьшилось на 21,2...25,6 %. При этом прослеживается тенденция к тому, что на фоне ежегодного внесения под бесменную озимую пшеницу N₄₅P₆₀K₄₅ негативная трансформация структурного состояния чернозема была выражена в большей мере, чем в варианте без удобрений.

Существенное влияние оказало агрогенное воздействие на водоустойчивость почвенной структуры чернозема типичного (табл. 2).

2. Влияние бесменного пара и бесменной озимой пшеницы на содержание водоустойчивых агрегатов в черноземе типичном Курской области.



| Высота | Содержание (%) агрегатов размером (мм) | | | | | | |
|---|--|-------|-------|------|------------|------------|-------|
| | >5 | 5...3 | 3...2 | 2..1 | I 1 ...0,5 | 0,5...0,25 | <0,25 |
| Целина | 9,2 | 15,6 | 14,4 | 18,4 | 15,2 | 9,4 | 17,8 |
| Бессменный пар | нет | нет | 0,2 | 1,9 | 9,2 | 29,6 | 59,1 |
| Бессменная озимая пшеница (без удобрений) | 1,1 | 1,4 | 2,0 | 5,1 | 9,8 | 26,6 | 54,0 |
| Бессменная озимая пшеница (N,5 ^P 6nK ₄₅) | 0,7 | 1,2 | 1,9 | 6,1 | 10,5 | 23,1 | 56,5 |
| НСР ₀₅ | 2,3 | 3,1 | 2,6 | 6,9 | 4,5 | 4,2 | 8,9 |

В пахотных почвах произошла существенная трансформация водоустойчивой структуры. В первую очередь обращает на себя внимание очень резкое уменьшение количества водоустойчивых агрегатов крупного размера. В варианте с бессменным паром отсутствуют агрегаты фракций > 5 и 5...3 мм, а в вариантах с бессменной озимой пшеницей они содержатся в очень незначительном количестве, на уровне 0,7...3,1 %. По сравнению с целинным черноземом, резко (на 24,8...30,7%) уменьшилось количество водоустойчивых агрегатов размером 1...3 мм, менее заметно (на 4,7...6,0 %) - содержание агрегатов фракции 1 ...0,5 мм. При этом доля водоустойчивых агрегатов размером 0,5...0,25 мм возросла на 13,7...20,2%, фракции < 0,25 мм – на 36,2...41,3%.

3. Влияние бессменного пара и бессменной озимой пшеницы на показатели структурного состояния чернозема типичного Курской области.

Важное значение для оценки почвенной структуры имеет размер структурных отдельностей. Средневзвешенный диаметр всей совокупности агрегатов целинного чернозема типичного равен 3,48 мм, у агрономически ценных агрегатов он несколько меньше - 3,41 мм. Средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов в 1,5 раза меньше, чем у агрономически ценных воздушно-сухих агрегатов и равен 2,27 мм.

После длительного использования чернозема под бессменный пар количество агрономически ценных агрегатов уменьшилось до 54,1 %, а коэффициент структурности - до 1,28. При таких показателях агрегатное состояние чернозема оценивается как хорошее. Количество водоустойчивых агрегатов размером > 0,25 мм, равное 40,9 %, была в 2 раза меньше, чем в целинном черноземе, что свидетельствует о хорошей водоустойчивости структуры. Однако их содержание уже вплотную приблизилось к уровню, когда водоустойчивость структуры будет считаться удовлетворительной. В негативную сторону изменился и размер структурных отдельностей. Средневзвешенный диаметр всей совокупности воздушносухих агрегатов увеличился более чем в 2 раза, а фракций, относимых к агрономически ценным агрегатам, - в 1,5 раза. Средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов, наоборот, резко уменьшился с 2,27 мм до 0,52 мм.

Под влиянием бессменной озимой пшеницы структурное состояние чернозема также изменилось, но в меньшей степени, чем в варианте с бессменным паром и не так однозначно. Хотя содержание агрономически ценных агрегатов, по сравнению с целинным черноземом, уменьшилось на 18,4...22,5 %, а коэффициент структурности снизился в 3,3...3,9 раза, агрегатное состояние чернозема под бессменной озимой пшеницей оценивалось как отличное. При этом средневзвешенный диаметр всей совокупности воздушно-сухих



агрегатов в варианте без применения минеральных удобрений достоверно не изменился, а при ежегодном внесении $N_{45}P_{60}K_{45}$ - увеличился до 5,00 мм. Средневзвешенный диаметр агрономически ценных агрегатов остался на исходном уровне. Общее количество водоустойчивых агрегатов уменьшилось до 43,5...46,0 %, водоустойчивость структуры оценивалась как хорошая.

Выводы. Таким образом, структурное состояние чернозема типичного под влиянием длительного бессменного пара и бессменной озимой пшеницы претерпело заметную трансформацию. По сравнению с целинным черноземом, в пахотных почвах заметно снизилось содержание агрономически ценных агрегатов, в результате чего возросла глыбистость структуры, и уменьшился коэффициент структурности. Наиболее существенные изменения с почвенной структурой произошли под влиянием бессменного пара. Пахотные почвы содержали заметно меньше водоустойчивых агрегатов, особенно размером > 1 мм, количество которых снизилось под бессменной озимой пшеницей в 6 раз, а под бессменным паром - в 27 раз, при этом средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов уменьшился соответственно в 2,5... 2,6 раза и 4,4 раза. Однако в целом, несмотря на негативные изменения, структура чернозема типичного оказалась довольно устойчивой к длительному экстенсивному агрогенному воздействию, в результате чего пахотные почвы сохраняют хорошее структурное состояние.

Литература

1. Вильямс В. Р. Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения. М.: ОГИЗ Сельхозгиз, 1946. 456 с.
2. Качинский Н. А. Физика почвы. Часть I. М.: Высшая школа. 1965. 323 с.
3. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. Гумматов Н. Г., Пачепский Я. А. Современные представления о структуре почв и структурообразовании: механизмы и модели, динамика и факторы (2-е изд.). Баку: Муаллим, 2016. 100 с.



УДК 631.43

ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОАГРЕГАТОВ В СУСПЕНЗИИ КАОЛИНИТА С БАКТЕРИЯМИ *BACILLUS VELEZENSIS*

Шейн Е. В.^{1,2}, Верховцева Н.В.², Быкова Г. С.², Сусленкова М.М.²

¹Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

²МГУ имени М. В. Ломоносова, факультет почвоведения, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы,
1, стр.12.

evgeny.shein@gmail.com

Аннотация В инокулированной микроорганизмами *Bacillus. Velezensis* каолининовой суспензии в течение 2-х месяцев электронномикроскопически прослежено формирования микроагрегатов определенной формы и размеров. Отмечено в изначально преобладающей плоскочешуйчатой структуре появление крупных (до 250 мкм диаметром) органоминеральных агрегатоподобных образований. *B. velezensis* в каолининовой суспензии и среде, не содержащей ионов калия, в процессе своей жизнедеятельности частично разрушали кристаллическую решетку минерала для обеспечения своей жизнедеятельности калием. Предлагается следующий механизм агрегатообразования в модельном опыте: сформированные *B. velezensis* белковые соединения амфифильной природы гидрофобизировали поверхность минералов, формируя за счет связей гидрофобного взаимодействия между частицами минерала органоминеральные микроагрегаты.

Ключевые слова: структура почвы, микробиологические воздействие, связи гидрофобного взаимодействия, микроагрегаты.

Введение

Исследования агрегатообразования в почвах являются актуальными и злободневными в современном почвоведении, в связи с физической деградацией почв, поддержанием водоустойчивости агрегатов, их механической устойчивостью и связанными со свойствами агрегатов функциями почв в биосфере. Поэтому процессам агрегатообразования и роли почвенной биоты в их формировании и свойствах уделяется в последнее время большое внимание [3-7]. В последние годы в исследовании процессов агрегатообразования наметилась гипотетическое направление, связанное с ролью амфифильных органических соединений, образованных почвенной микробиотой. Эти амфифильные соединения, включающие гидрофильные и компоненты биологической природы, способствуют соединению минеральных частиц в устойчивые микроагрегаты. Механизм в большинстве случаев рассматривается такой: в видной среде гидрофильные компоненты органического вещества почв соединяются с гидрофильной поверхностью минеральных частиц, а гидрофобные компоненты образуют связи гидрофобного взаимодействия, соединяя уже образовавшие гидрофильные органоминеральные комплексы. Таким образом образуются агрегированные органоминеральные соединения, «клеем» в которых служит амфифильное органическое вещество микробиологической природы [1,2,7]. Имеются фактические данные, которые могут служить подтверждением такого рода механизма, в основном, косвенного плана благодаря разнообразным анализам и экспериментам на различных почвенных сельскохозяйственных угодьях, природных объектах [3-6]. В данном исследовании осуществлена попытка в модельном эксперименте проследить агрегатообразование частиц каолинита в суспензии с определенным видом микроорганизмов. Идея прямого модельного эксперимента заключалась в том, что бактерии *Bacillus velezensis* в суспензии с каолинитом,



потребляя необходимый им для жизнедеятельности ион калия из глинистого минерала, формировали белковые соединения в виде собственных тел и специфических выделений гликопептидной и полисахаридной природы. Эти соединения амфифильного характера способствовали соединению частиц каолина, формируя микроагрегаты, тем самым увеличивали долю микроагрегатных фракций. Цель статьи: в модельном эксперименте в суспензии каолинита с бактериями *B. velezensis* в динамике проследить за формированием агрегатоподобных образований с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Задачи работы: (1) в течение длительного времени (60 суток) провести модельный опыт с суспензией каолинита и бактериями *B. velezensis*; (2) в динамике отбирать пробы суспензии, а также контроля и исходной суспензии каолинита и исследовать суспензии на наличие, форму и состояние агрегатоподобных образований и (3) с помощью метода СЭМ морфологически показать изменения исходного каолинита и образованных органоминеральных агрегатоподобных образований.

Объекты и методы

Чистая культура *Bacillus velezensis*, была выделена нами с поверхности отмытого водой от органического вещества речного песка. Предполагалось, что существование такой бактерии возможно в столь экстремальном местообитании, если она способна извлекать из кремнезема необходимые ей калий и фосфор, а азот она может фиксировать из воздуха. Подобным образом была выделена силикатная бактерия *Bacillus muciluginosus* в прошлом веке В.Г. Александровым (Александров, 1953). Дальнейшее определение культуральных и физиолого-биохимических свойств бактерии, а также метод ДНК-ДНК гибридизации позволил отнести выделенную культуру к виду бацилл – *Bacillus velezensis*. Чистую культуру *Bacillus velezensis* в течение 3-5 дней культивировали на твердой питательной среде (пептический перевар животной ткани – 5 г/л; натрия хлорид – 5 г/л; мясной экстракт – 1,5 г/л; дрожжевой экстракт – 1,5 г/л; агар-агар – 15 г/л) в термостате при температуре 28 °С. Колонии смывали стерильным физраствором в колбу с жидкой питательной средой. Полученную суспензию использовали для модельного эксперимента. В ходе которого предполагалось в течение двух месяцев культивировать микроорганизмы в жидкой питательной среде для силикатных бактерий, где единственным источником калия был исследуемый глинистый минерал. Гипотеза модельного эксперимента заключалась в том, что, извлекая из минерала калий, микроорганизмы будут разрушать минерал, а продукты их метаболизма в виде новообразованных органических веществ будут модифицировать его поверхность, способствуя образованию микроагрегатов. Половину колб засеивали микробной взвесью с концентрацией $2,7 \cdot 10^7$ КОЕ/мл. Оставшиеся колбы для контроля не засеивались микроорганизмами. После посева все колбы хранили в помещении с температурой воздуха 27°С. Содержимое колб перемешивалось раз в сутки.

Регулярно проводились отборы проб твердой фазы для определения гранулометрического и микроагрегатного составов на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac Bluewave (Microtrac, США) [2]. Исследование морфологии минерала осуществлялось с помощью микроскопирования на СЭМ JSM-6380-LA (JEOL). Работа на СЭМ проводилась в Общефакультетской лаборатории электронной микроскопии Биологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова. Образцы, просеянные через сито с диаметром сетки 1 мм, наклеивали на алюминиевые столики, высушивали в условиях высокого вакуума, напыляли смесью металлов Ag и Au для предотвращения образования избыточного заряда на поверхности образцов. Съемку на СЭМ проводили при 20 kV, WD=10, SpotSize=30 [1], на увеличения от x30 до x20000.



Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены дифференциальные кривые гранулометрического и микроагрегатного состава исследуемых образцов. Все распределения имеют форму кривой с одним ярко выраженным пиком. В гранулометрическом составе всех образцов преобладает фракция 10-50 мкм, на которую приходится порядка 60%. Также существенным было содержание фракций 5-10 и 1-5 мкм – 20 и 13%, соответственно. В микроагрегатном составе фракция 10-50 мкм также является преобладающей (более 60%), содержание фракций 5-10 и 1-5 мкм снижается в среднем на 5%, в то время как содержание фракций крупнее 50 мкм возрастает (содержание микроагрегатной фракции 50-250 мкм выше гранулометрической на 10 %).

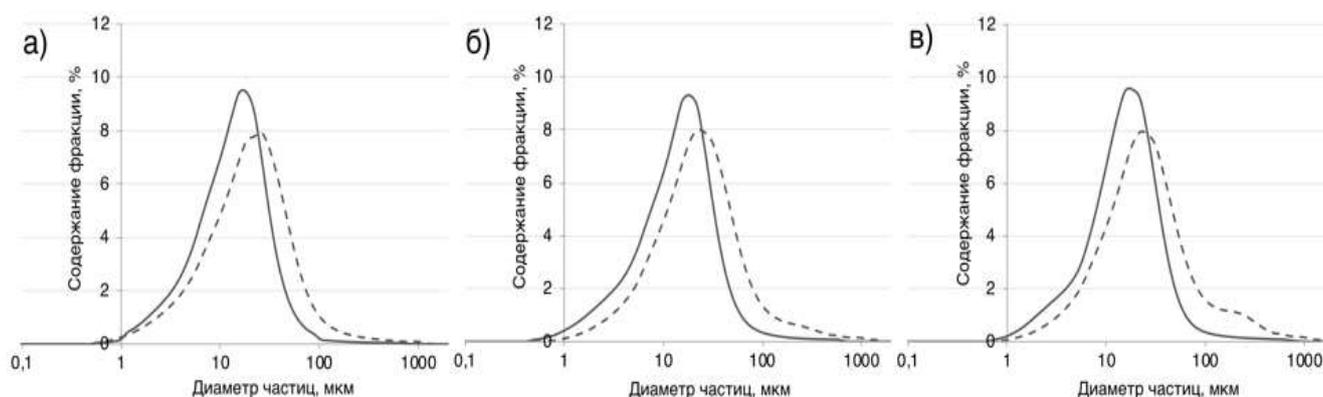


Рис. 1. Гранулометрический (сплошная линия) и микроагрегатный (пунктирная линия) состав каолинита разного срока инкубации с микроорганизмами (а – исходный каолинит; б – 10-е, в – 60-е сутки инкубации).

Приведенные данные по гранулометрическому и микроагрегатному анализу каолиновой суспензии указывают на то, что за время эксперимента произошло увеличение количества микроагрегатов диаметром 50-250 и 250-500 мкм на 5,4 и 1,5%. В контрольных образцах за время инкубации не происходило значимых изменений. Отметим формирование к концу эксперимента (рис.1, в) весьма заметной доли микроагрегатов 250-500 мкм, формирующих заметное «плечо» в распределении микроагрегатов по размерам.

Во время эксперимента регулярно отбирались пробы и производились наблюдения за изменением агрегатоподобных образований с помощью сканирующего электронного микроскопа. Уже в первом приближении (x30) видно (рис. 2), что в конце эксперимента образуются крупные микроагрегаты, сцементированные органическим веществом, которое на снимках выделяется ярко выраженным контрастным белым свечением.

На следующем рисунке (рис.3 б) показан один из образовавшихся за два месяца инкубации микроагрегатов в большем приближении. Видно, что он состоит из мелких чешуек минерала, сцементированных органическим веществом – метаболитами микроорганизмов.

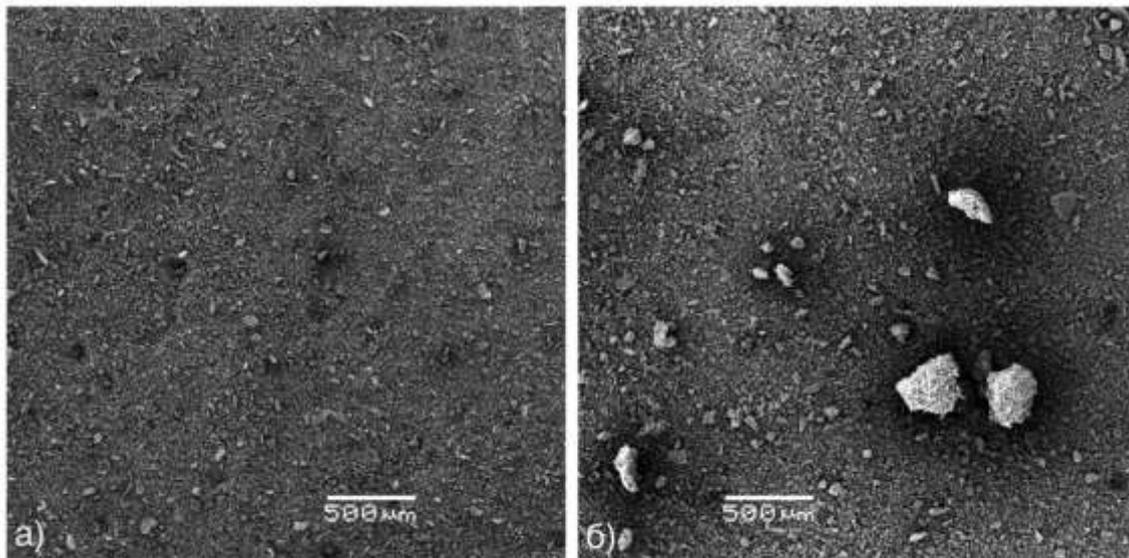


Рис. 2. СЭМ-снимки (а) исходного минерала и (б) минерала после двух месяцев инкубации микроорганизмами (30x приближение)

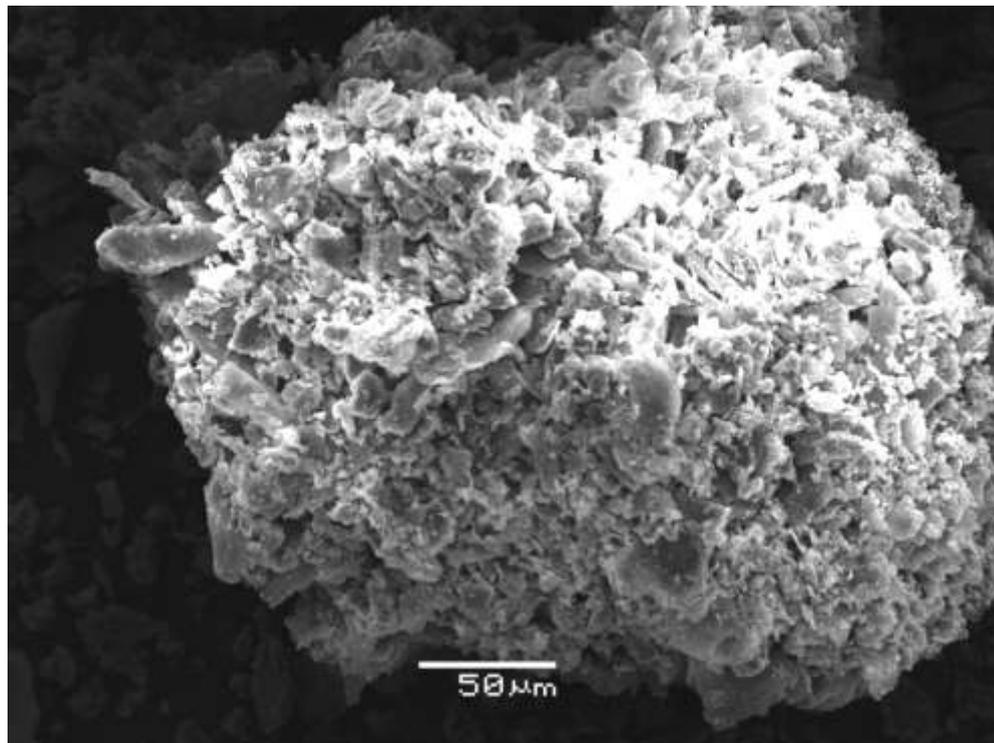


Рис. 3. СЭМ-снимок микроагрегата, образовавшегося через два месяца модельного эксперимента (приближение x350).

Проследим в динамике, как изменялся исходный минерал и формировались агрегатоподобные образования. Сравним морфологию исходного и модифицированного минерала (рис. 4) в различные сроки эксперимента и при различном увеличении. Если исходный минерал представлен отдельными частицами разного размера, покрытыми мелкими чешуйками, то уже через 10 дней инкубации эти чешуйки начинают больше отстоять от поверхности минеральных частиц, становятся более выпуклыми. Постепенно эти чешуйки отрываются от минеральных отдельностей и склеиваются в микроагрегаты.



Как мы видим, микробиологическая модификация изменяет физические свойства минерала. Извлекая необходимые питательные вещества, микроорганизмы разрушают минерал, в то же время, метаболиты склеивают мелкие частицы в проагрегаты. Уже через два месяца активности *Bacillus sp.* наблюдается увеличение фракций 50-250 и 250-500 мкм микроагрегатного состава на 5,4 и 1,5%. В это же время значимо возрастает прочность структурных связей в минеральной суспензии. Через 50 дней эксперимента происходит рост удельной поверхности микробиологически модифицированного минерала почти в два раза. Происходят значительные изменения в микроморфологии каолинита. Безусловно, приведенные результаты не являются абсолютным и единственным доказательством гипотезы, утверждающей, что метаболиты микроорганизмов модифицируют поверхность глинистого минерала и способствуют соединению отдельных частиц минерала в агрегатоподобные образования, т.е. способствуют склеиванию мелких минеральных элементарных частиц в проагрегаты. Однако, эти данные безусловно показывают изменение агрегатного состояния частиц каолинита в суспензии, формирование проагрегатов. Физико-химический механизм этого процесса, видимо, связан с формированием органических амфифильных компонентов автохтонной природы, способствующих образованию органо-минеральных микроагрегатов за счет связей гидрофобного взаимодействия.

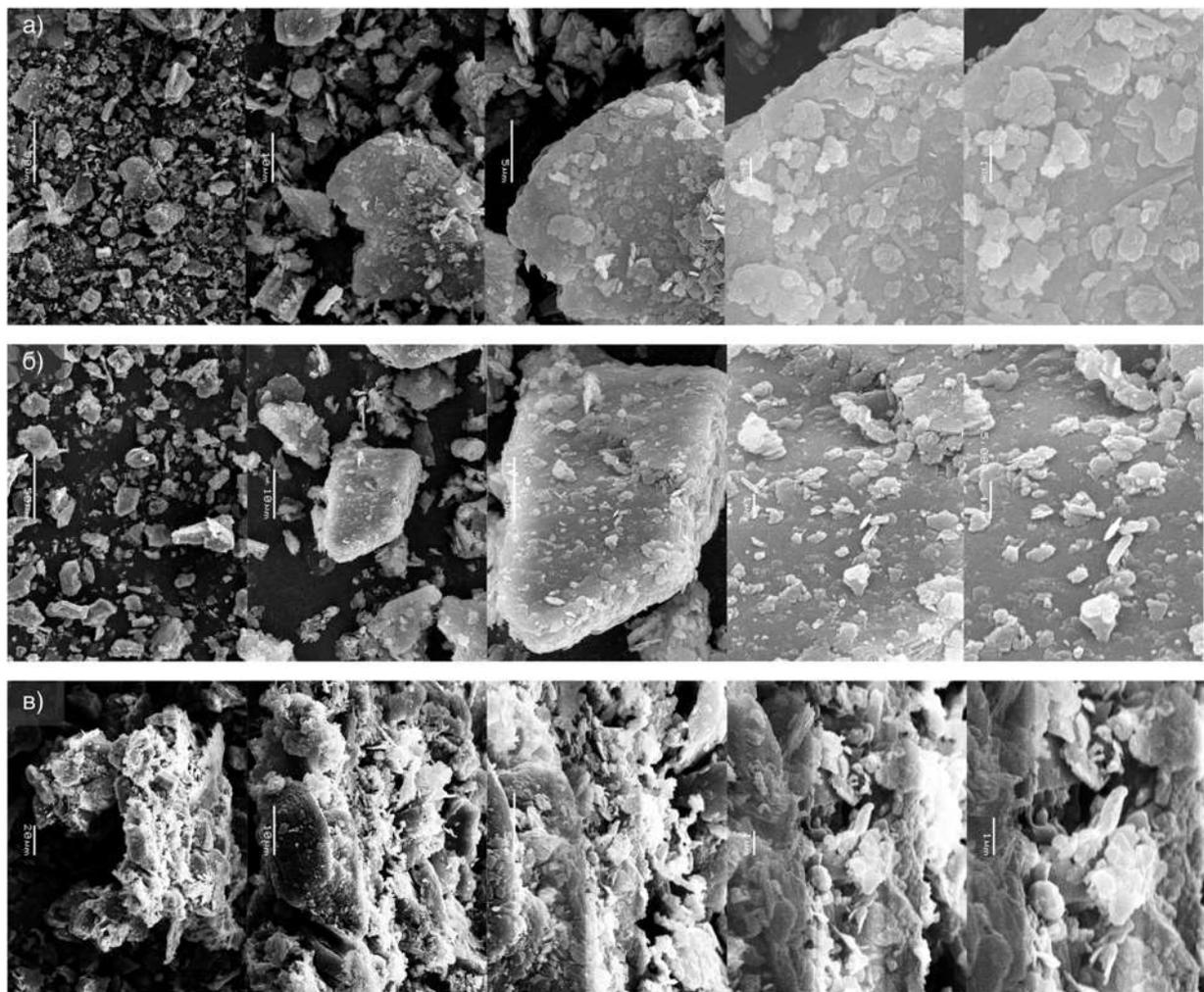


Рис. 4. СЭМ-снимки исходного минерала и минерала после инкубации чистой культурой *Bacillus sp.* при приближении $\times 500$ – $\times 15000$ (а – исходный каолинит; б – 10-е, в – 60-е сутки инкубации).



Заклучение

Данное исследование посвящено электронномикроскопическим наблюдениям формирования микроагрегатов к каолининовой суспензии благодаря инокуляции микроорганизмов *B. velezensis*. Авторы безусловно не претендуют на обоснование физического механизма формирования отмеченных микроагрегатов. Подчеркивается сам факт формирования микроагрегатов определенной формы и размеров за 2-х месячный срок инкубации в каолининовой суспензии *B. velezensis*. Однако, авторы исходят из предположения следующего механизма образования микроагрегатов: микроорганизмы в каолининовой суспензии, в среде, не содержащей ионов калия, в процессе своей жизнедеятельности частично разрушали кристаллическую решетку минерала для обеспечения своей жизнедеятельности калием. В свою очередь формировались белковые соединения в виде собственных тел и специфических выделений белковой природы. Эти соединения, вероятно, гидрофобизировали поверхность минералов, формируя органо-минеральные микроагрегаты за счет связей гидрофобного взаимодействия между частицами минерала

Благодарности

Исследования выполнены частично за счет средств РФФИ, проекты №№ 19-04-01056 и 19-04-01298.

Список литературы

- Сусленкова М.М., А.Б.Умарова, М.А.Бутылкина «Микроструктура почв разного генезиса и ее трансформация в составе конструкторземов в условиях г.Москвы», Почвоведение, 2018, №10, с.1265-1273
- Юдина А. В., Милановский Е. Ю. Микроагрегатный анализ почв методом лазерной дифракции: особенности пробоподготовки и интерпретации результатов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 89. С. 3-20. doi: 10.19047/0136-1694-89-3-20
- S. Abiven, S. Menasseri and C. Chenu, “The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—a literature analysis” *Soil Biol. Biochem.* 41: 1–12 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- H. Bossuyt, K. Denef, J. Six, S.D. Frey, R. Merckx and K. Paustian, “Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability” *App. Soil Eco.* 16(3), 195-208 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00116-5)
- X. Chen, Z. Li, M. Liu, C. Jiang and Y. Che, “Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20 years” *J. Soils Sed.* 15(2), 292–301 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0981-6>
- M.A. Redmile-Gordon, P.C. Brookes, R.P. Evershed, K.W.T. Goulding and P.R. Hirsch, “Measuring the soil-microbial interface: extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from soil biofilms” *Soil Biol. Biochem.* 72, 163–171 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.025>
- Shein E., Milanovskiy E. Soil structure formation: role of the soil amphiphilic organic matter // *Biogeosystem Technique.* 2014. № 2(2). P.182–190.



УДК 631. 445

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОЧВ, КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ СФОРМИРОВАННЫХ НА ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТРИАСА

Шваров А.П.¹, Тюгай З.¹, Иванов А.В.¹, Лебедев И.Е.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
ashvarov@mail.ru

THE SURFACE PROPERTIES OF THE SOLID PHASE OF UMBRISOLS DEVELOPED ON ELUVIUM TRIASSIC SEDIMENTS OF THE KOSTROMA REGION.

Shvarov A.P., Tyugai Z, Ivanov A.V., Lebedev I.E.
Soil Science Faculty, Moscow State University, Russia

Annotation:The main indicators characterizing the surface properties of soils formed on the eluvium of Triassic clays were studied. The evaluation of the categories of specific surface area and the degree of hydrophilicity of the soil. The features of water vapor sorption and the nature of the ultraporosity structure of the solid phase of the studied soils

Введение

Обобщенные понятия и определения, используемые в генетическом почвоведении, зачастую не несут в себе информацию об аспекте почвы как физическом теле, внутри которого происходят процессы переноса веществ и энергии и др. В почве поверхностные явления выражены наиболее полно и могут служить основой для тонкой диагностики протекающих в ней процессов. Сопряженное изучение геометрии, энергетического состояния и свойств межфазных поверхностей раздела, состава почвенных растворов, а также вносимых в почву химических соединений дает возможность построить реальные модели почвенных агрегатов и связать поверхностные явления с основными макроскопическими свойствами почв, найти пути их направленного изменения, улучшения и оптимизации. Изучение поверхностных явлений в почве – это, в сущности, изучение процессов и свойств почв и управление ими на молекулярном уровне (Воронин, 1975).

Характеристика поверхностных явлений в почвах

Одной из основных физических характеристик поверхности твердой фазы почв является величина удельной поверхности почвы, рассчитываемая по методам БЭТ и Фаррера. Однако, не всегда характеристика величин общей, внешней и внутренней удельной поверхности, оказывается достаточна для описания физико-химических процессов, протекающих в почвах. Очень важной характеристикой поверхности твердой фазы почв является оценка его качества: оценка ее гидрофильности. Для оценки качества поверхности почвы, ее гидрофильности необходимо знать количественную характеристику явления смачиваемости почв – величину краевого угла смачивания (КУС).

Существующие в литературе современные методы определения КУС не всегда дают возможность сравнительной оценки полученных результатов измерения КУС. Это связано как со сложностью самого объекта исследования, так и с особенностями пробоподготовки образца к анализу. Мы в своей работе предлагаем рассмотреть другой подход к количественной оценке явления смачивания почвы. Он базируется на строгой термодинамической оценке состояния воды в момент формирования первого слоя



смачивающей жидкости (Вернов, Лопаткин, 1983). Из уравнения Юнга можно получить представление о косинусе угла смачивания по разности величин, поверхностных натяжений на границах твердое тело–газ и твердое тело жидкость

$$\gamma_{т-г} - \gamma_{т-ж} = \gamma_{ж-г} \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

В свою очередь, $\cos\alpha$ можно определить из изотерм сорбции паров воды почвами. Для капли, лежащей на горизонтальной гладкой поверхности, в качестве переменной величины можно взять площадь смоченной поверхности $S_{т-ж}$. При увеличении площади контакта жидкости с твердым телом на величину $dS_{т-ж}$ площадь раздела твердое тело–газ уменьшится на такую же величину. Таким образом

$$dS_{т-ж} = dS_{т-г} \quad (2)$$

Поверхность раздела жидкость – газ увеличится при этом на величину $dS_{ж-г}$. При равновесии свободная поверхностная энергия системы будет равна

$$dG_{пов} = \gamma_{ж-г} \cdot dS_{ж-г} + \gamma_{т-ж} \cdot dS_{т-ж} - \gamma_{т-г} \cdot dS_{т-ж} = 0 \quad (3)$$

Из уравнения 3 следует

$$\gamma_{т-г} - \gamma_{т-ж} / \gamma_{ж-г} = dS_{ж-г} / dS_{т-ж} = \cos\alpha \quad (4)$$

Полагая, что $dS_{т-ж} = S_t$, т.е. пропорциональна величине монослоя воды по БЭТ W_m по БЭТ, а $dS_{ж-г} = S_e$ и пропорциональна величине монослоя воды по Фарреру $(W_m)_e$ можно уравнение 4 записать в виде

$$(W_m)_e / W_m = \cos\alpha \quad (5)$$

А.Д. Воронин (1963) отмечал, что для более точной оценки качества поверхности желательнее иметь представление о характере ультрапористости почв.

Разнообразные адсорбенты могут быть разбиты на сравнительно небольшое число основных структурных типов (Киселев, 1949).

Каждому из типов адсорбентов по Киселеву свойственна четкая, только ему присущая изотерма сорбции паров и кривая распределения объема пор по эффективным радиусам. Следовательно, по изотермам сорбции можно судить о структурных особенностях поверхности адсорбента (Воронин, 1963).

Отнесение изотерм изученных почв к структурам из классификации А.В.Киселева (1949) можно получить анализом кривых распределения объемов ультрапор по величине эффективных радиусов.

Поскольку объем сорбированной воды (W) является функцией среднего радиуса капилляра (r), ультрапористость можно представить в виде кривой, полученной дифференцированием экспериментально определенной изотермы сорбции по r , т.е.

$$dW/dr = f(r) \quad (6)$$

размер радиуса r определяется из уравнения Томсона

$$\ln P/P_0 = - 2 M\sigma / \rho R T r \quad (7)$$

из уравнения 8 можно выразить радиус капилляра r :

$$r = 2M\sigma / \rho R T \ln P_0 / P = 2V\sigma / R T \ln P_0 / P, \quad (8)$$

где P – давление пара над вогнутым мениском; P_0 – давление насыщенного пара над плоской поверхностью; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная, σ –



поверхностное натяжение; V – молекулярный объем жидкости ($V=M/\rho$, где M – молекулярный вес жидкости, ρ – ее плотность).

Цель настоящей работы – дать количественную и качественную характеристику поверхностных свойств почв Костромской области, сформированных на глинистых отложениях триаса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужили остаточно-гидроморфные почвы склонов Северных Увалов, сформированные на глинистых отложениях триаса: темно-гумусовая почва под лесом и агроземы. Изотермы десорбции паров воды почвами определяли методом сорбционного равновесия над насыщенными растворами солей, создающих относительное давления паров воды равных: 0,15; 0,32; 0,55; 0,86; 0,98. Полную удельную поверхность рассчитывали методом БЭТ, внешнюю удельную поверхность по Фарреру (Теория и методы физики почв, 2007). Содержание углерода – методом кулонометрического титрования на экспресс-анализаторе АН-7529. Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифрактометрии (Шейн и др., 2017).

Результаты исследования и их обсуждение

Общим свойством для данного ряда почв является тяжелый гранулометрический состав почв. Он унаследован от почвообразующей породы – элювия триасовых глин. При этом темногумусовая остаточно-гидроморфная почва отличается от двух других разновидностей более тяжелым составом. При этом отмечается рост содержания физической глины вниз по профилю от 50,14% в верхнем, гумусовом слое до 67,42% в оглеенной почвообразующей породе. В старопашотной серо-гумусовой почв более тяжелым составом отличается оглеенный слой на глубине 70-90 см, где содержание физической глины достигает 65,33%. Из рассматриваемого ряда почв наиболее легким по составу является агрозем светлый, в котором содержание физической глины не превышает 55,62%.

Исследуемые почвы в значительной степени дифференцированы по содержанию органического углерода. Максимальное содержание C органического вещества отмечено в верхнем горизонте темно-гумусовой почвы – 17,7%. Это органогенный горизонт отличается по всем параметрам твердой фазы, в том числе по поверхностным свойствам.

Гранулометрический состав (дисперсность) и содержание органического углерода в значительной степени определяют поверхностные свойства почв, в первую очередь сорбционную способность. На рисунках 1а и 1б показаны изотермы десорбции паров двух разновидностей почв.

Форма изотерм десорбции паров воды практически всех образцов указывает на переходный тип ультрапористости от непористого к смешанному, неоднородно-пористому. И лишь изотерма десорбции горизонта АU темно-гумусовой почвы (рис.1а) указывает на чисто смешанный тип ультрапористости. Это дает основание согласно концепции А.В. Киселева достаточно надежно определять полную удельную поверхность почв по БЭТ (Киселев, 1949).

Характер и особенности ультрапористости исследуемых почв наглядно показан на рисунках 2а и 2б. При этом выделяется органогенный горизонт АU темно-гумусовой остаточно-гидроморфной почвы. Объем сорбированной влаги (dw/dr) в наиболее тонких порах (1-2 мкм) здесь максимален и превышает 100 единиц. В чисто минеральных горизонтах этой же почвы ультрапористость значительно снижена (рис.2а). Ультрапористость почв в агроземе светлом принципиально отличается. Максимальной величиной сорбированной



влаги в наиболее тонких порах характеризуется оглеенный горизонт Cg, а минимальной величиной пахотный горизонт PY (рис.2б).

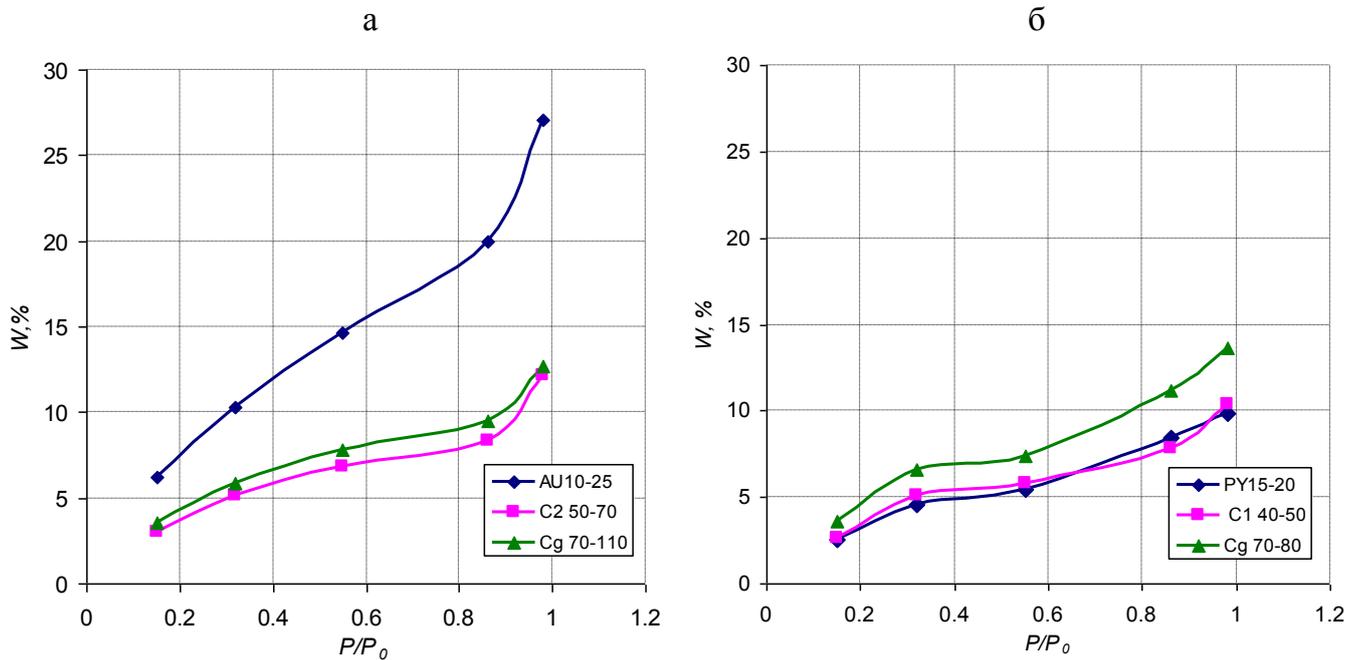


Рис.1. Изотермы десорбции паров воды: а – темно-гумусовой остаточно гидроморфной почвы, б – агрозема светлого

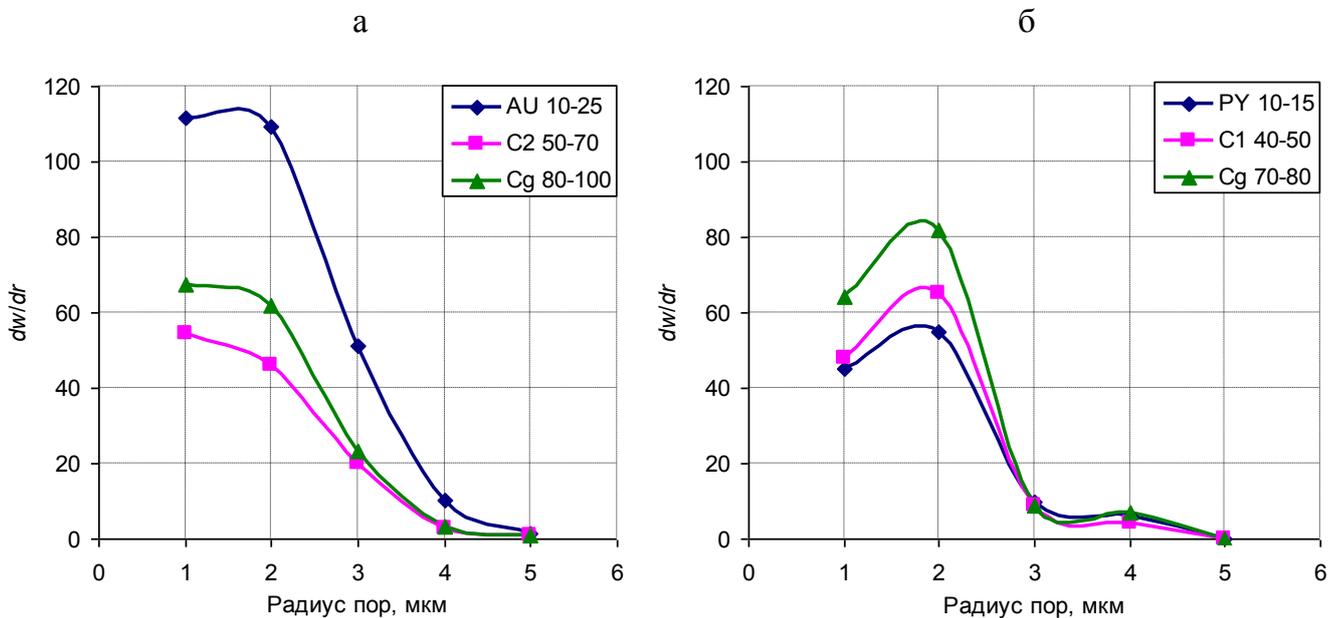


Рис.2. Ультрапористость почв: а – темно-гумусовой остаточно гидроморфной почвы, б – агрозема светлого

Энергетическую и геометрическую неоднородность поверхность почвы характеризует величина удельной поверхности. Исследуемые почвы в значительной степени дифференцированы по этому показателю. С одной стороны это объясняется их



почвообразующей породой тяжелого состава, а также наложение почвообразовательных процессов, связанных как с гумусообразованием, так и выраженности процессов оглеения, т.е. степенью их гидроморфизма. Абсолютным максимумом по величине полной удельной поверхности отличается верхний органогенный горизонт темно-гумусовой почвы. Здесь этот показатель достигает величины 298 м²/г. (табл.1). В чисто минеральных горизонтах исследуемых почв величина полной удельной поверхности варьирует от 89 до 227 м²/г., причем наибольшие значения отмечены в оглеенных горизонтах (табл.1).

Таблица 1 Характеристика поверхности исследуемых почв

| Почва | Горизонт, глубина, см | S полная поверхность м ² /г | S внешняя. поверхность м ² /г. | cos φ | Краевой угол смачивания φ, в градусах |
|---|-----------------------------|--|---|-------|---|
| Темно-гумусовая остаточно- гидроморфная | AU 10-25 | 298 | 88 | 0,30 | 73 |
| | C 50-70 | 161 | 61 | 0,38 | 67 |
| | Cg 70-110 | 178 | 74 | 0,42 | 65 |
| Агрозем светлогумусовый остаточно гидроморфный | PY 20-25 | 113 | 62 | 0,61 | 52 |
| | C 50-60 | 89 | 61 | 0,69 | 46 |
| | Cg 80-90 | 130 | 68 | 0,52 | 59 |
| Агрозем светлый | PY 15-20 | 152 | 83 | 0,54 | 57 |
| | C1 40-50 | 181 | 54 | 0,29 | 73 |
| | Cg 70-80 | 227 | 74 | 0,33 | 71 |

Генетические особенности исследуемых почв отразились и на показателе качества поверхности – на величинах краевого угла смачивания (КУС). Исследованные нами темно-гумусовые достаточно гидроморфные почвы характеризуются высокими значениями величин угла смачивания: КУС колеблется от 73° – 65° градусов и максимальны в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте, а вниз по профилю плавно уменьшаются. В агроземах величины КУС колеблются от 52° до 71° градусов и минимальные в верхнем гумусовом горизонте, а вниз по профилю плавно увеличиваются.

Выводы

1. Наибольшей величиной полной удельной поверхности характеризуется верхний органогенный горизонт темно-гумусовой достаточно-гидроморфной почвы. (S полная = 298 м²/г.) В чисто минеральных горизонтах исследуемых почв величина полной удельной поверхности варьирует от 89 до 227 м²/г., причем наибольшие значения выражено в оглеенных горизонтах. Различия в сорбционной способности в генетических горизонтах исследованных почв обусловлены как содержанием органического вещества, так и процессами оглеения.
2. Форма изотерм десорбции паров воды практически всех образцов указывает на переходный тип ультрапористости: от непористого к смешанному, неоднородно-пористому. И лишь изотерма десорбции горизонта AU темно-гумусовой почвы указывает на чисто смешанный тип ультрапористости.
3. Исследованные темногумусовые достаточно гидроморфные почвы характеризуются высокими значениями величин угла смачивания: Он колеблется от 73° до 65° градусов



- и максимальны в верхнем гумусово-аккумулятивном горизонте, а вниз по профилю плавно уменьшаются. В агроземах величины КУС колеблются от 52° до 71° градусов .
4. Гидрофобность исследуемых почв растет на фоне процессов гумусообразования и глееобразования.

Литература

1. Вернов А.В., Лопаткин А.А. Термодинамическая теория поверхностных явлений и ее применение к адсорбции на твердых адсорбентах. – В кн. Адсорбция в микропорах, М, 1983, с.15-24
2. Воронин А.Д. О характере ультрапористости фракций механических элементов комплекса почв светло-каштановой подзоны. Научные доклады Высшей школы, Биологические науки, 1963, №3, с. 189-192
3. Воронин А.Д. Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки, 1975, №12. с.7-15
4. Киселев А.В. Основные структурные типы адсорбентов и их влияние на адсорбционные свойства Журн. Физ. химия, 1949 г. т.23, вып. 4
5. Теория и методы физики почв. Коллективная монография. Под редакцией Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. Изд-во “Гриф и К”, 2007 г.
6. Шеин Е.В., Милановский Е, Ю., Хайдапова Д.Д., Поздняков А.И., Тюгай З., Початкова Т.Н., Дембовецкий А.В. Практикум по физике твердой фазы почв. Учебное пособие. Рабочая тетрадь Москва 2017 год. с 117.



СЕКЦИЯ 2. ПОЧВЕННАЯ ГИДРОЛОГИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ПОЧВОВЕДЕНИИ



WATER MOVEMENT IN RELATION TO PORE SIZE DISTRIBUTION IN CULTIVATED CLAY SOILS IN THE NILE DELTA

Abdelmonem Mohamed Amer

Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Menoufia University, 32511 Shebin EI-Kom, Egypt
Tel.: +2 (050) 2337480, Fax: +2 (02) 25769495,
amer_abdel@hotmail.com

Abstract. The aim of this study is to propose equations to estimate water movement in cultivated clay soils. Water flow parameters were represented as unsaturated hydraulic conductivity $K(\theta)$ [LT⁻¹], diffusivity, D [L²T⁻¹] and intrinsic permeability, k [L²] in plant-root zone. Two alluvial clay soils located at northern Nile Delta were used to apply the assumed equations. The soils were planted with cotton yield during 2014 season. The soil profiles were different in their salinity, clay % and source of irrigation water. The equations applied to predict soil water movement parameters considered only the matric potential as a driving force in capillary pores, and gravitational potential that is critical for the large, non-capillary pores. An equation for predicting a suggested parameter; conductivity potential of soil pores $K_p(\theta)$ [M L⁻¹T⁻³] (erg. cm⁻³.sec⁻¹ or joule. m⁻³ sec⁻¹) was derived in vadose zone. Data of pore size distribution were obtained for the investigated soil profiles using water retention data. The calculated $K(\theta)$, $D(\theta)$ and k values were conformable to the common measured ranges, indicating the applicability of the proposed equations for predicting water movement parameters in cultivated clay soils.

Key words: unsaturated hydraulic conductivity; diffusivity; conductivity potential; soil pore classes; cultivated clay soils.

Introduction

The unsaturated condition of soil water is a major state in nature after irrigation process or rain fall. The effects of the unsaturated flow of water on minimizing the moisture gradients within the root zone are worthy of further investigation. The drainable and capillary pores are the main factors that affect water movement from a wet point to a dry one depending on moisture gradients. The vertical and lateral flow of water by gravitational forces occur through the large, non-capillary drainable soil pores, while redistribution and upward movement of water occur through capillary soil pores. The ability of pores to conduct water is controlled by soil pore volume, size, shape, type, continuity, and distribution in soil. Baver, et al. (1972) stated that the soil pore sizes could be classified into non-capillary pores, coarse capillary pores and fine capillary pores (FCP). The non-capillary pores represent the volume of the large pores or rapidly drainable pores (RDP), while coarse capillary pores (CCP) represent the slowly drainable pores (SDP) and water holding pores (WHP). The pressure head that is corresponding to the cutoff between capillary and non-capillary pores could be specified as $h=10$ kPa (Marshall, 1956; Amer, 2009). Quantifying unsaturated water flow into soil pores requires knowledge of hydraulic conductivity $K(\theta)$ and soil water retention $h(\theta)$ (Dane and Topp, 2002). It would be advantageous to estimate unsaturated conductivity function from the retention curve without the need for any further measurements.

The objective of this work was to propose equations to predict unsaturated hydraulic conductivity, $K(\theta)$, intrinsic permeability, k , diffusivity, $D(\theta)$ and conductivity potential (conductivity capacity), $K_p(\theta)$ of capillary and non-capillary pores at different pressure heads of soil. The assumed equations were based on water retention function $h(\theta)$ for agricultural-alluvial clay (saline and non-saline) soils cultivated with cotton yield in the Nile Delta.

Pore size classes

The relation between equivalent (cylindrical) pore size radius (r) and pressure head (h) in length unit [L] or water potential (ψ) [M L T⁻²] where $\Psi=\rho_wgh$, can be estimated using the capillary equation (Hillel, 1980):



$$h = \frac{2\gamma \cos \alpha}{gr\rho_w} \quad \text{----- (1)}$$

where, γ is surface tension between water and air (at 20°C = 0.0727 kg s⁻²), $\cos \alpha$ is assumed to be 1 for the wet surface, g is acceleration due to gravity (9.8 m s⁻²), and ρ_w is density of water (998 kg m⁻³ at 20°C). Pore size classes were determined from soil water retention curves (Stakeman, 1996) by applying equation (1). The equivalent pressure (h) ranges of $\Psi = 0-10, 10-33, 10-1500, 33-1500,$ and > 1500 kPa, are roughly corresponding to the diameters of rapid draining pores (*RDP*), slowly draining pores (*SDP*), coarse capillary pores (*CCP*), water holding pores (*WHP*) (or the available water), and fine capillary pores (*FCP*). Pore classes (Fig.1) can be combined into total draining pores (*TDP*= 0-33 kPa) and total water-storage pores (*WSP* > 33 kPa).

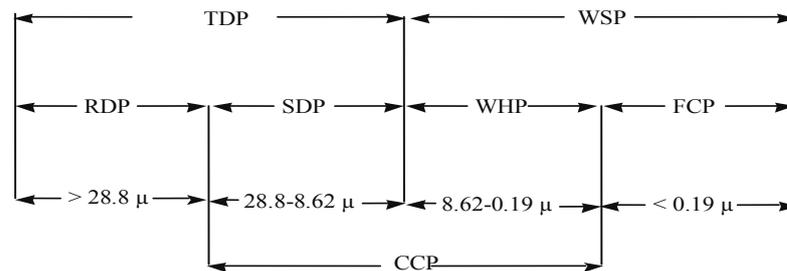


Fig. 1. Pore size classes and diameters.

Using Eq.1, the cutoff equivalent r for h of $\Psi = 10, 33,$ and 1500 kPa are 14.47, 4.36, and $0.099 \mu\text{m}$ respectively. The ratio of air to water in soil or drainable pores to capillary pores = $(\theta_{>4.36\mu\text{m}}) / (\theta_{<14.47\mu\text{m}})$ and the *AWR*, available water ratio = $(\theta_{0.099-4.36\mu\text{m}}) / (\theta_{<14.47\mu\text{m}})$.

Hydraulic conductivity as related to pore's radius and water content

If soil pores are modeled by strait, cylindrical capillary pores, the Poiseuille's equation for water flow (discharge), q [L³ T⁻¹] through one capillary tube could be applied:

$$q = \frac{\pi\rho_w gr^4}{8\eta} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad \text{----- (2)}$$

where, $\Delta h/\Delta L$ total hydraulic gradient; Δh is pressure head in terms [L] acting on distance (ΔL) of moisture range ($\Delta\theta$). The terms $\frac{\pi\rho_w gr^4}{8\eta}$ represents the hydraulic conductivity through the capillary pores tube as compared with Darcy's law. Thus, for number n ($=\Delta\theta/\pi r^2$) of homogeneous pores, the total hydraulic conductivity, $K(\theta)$ [L T⁻¹] into n soil pores would be as (Amer, 2012):

$$K(\theta) = \frac{n\pi\rho_w gr^4}{8\eta} \quad \text{or} \quad K(\theta) = \frac{\rho_w gr^2 \Delta\theta}{8\eta} \quad \text{----- (3)}$$

where η is water viscosity (0.001 kg m⁻¹ s⁻¹ at 20°C), and $\Delta\theta$ is the volume fraction of pores occupied by water expressed as a ratio of soil bulk volume (m³.m⁻³), or of total volume pores ($\Delta\theta/\theta_s$), where θ_s is saturated water content.

Water flow is directed from high hydraulic pressure head to low hydraulic pressure head in soil. On the directions of $x, y,$ and z among long tortuous pathways of different pore sizes, the $K(\theta)$ is differ by orders of magnitude due to very small changes in soil porosity and in water potential as well as in saturation degree (θ_i/θ_s). Then $K(\theta)$ values for any pore size class will be reduced by about 200fold (Sudnityn, 1979), and then:



$$K(\theta)_i = \frac{\rho_w g r^2}{8\eta T} \frac{\Delta\theta_i}{\theta_s} \text{ ----- (4)}$$

where T = tortuous pathways factor ($T=200$) and $\Delta\theta_i$ is soil moisture content at certain pore size class (i).

It was found that in narrow capillaries, the flux is smaller than that which is predicted by Poiseuille's equation for viscous flow (Ravina and Zaslavsky, 1968). So, the Eq.4 should be adjusted by adding a matching factor ($= K_s / K_c$) or ratio of measured saturated K_s to that calculated (K_c) at $\Delta\theta < 1$ kPa for $r \geq 0.15$ mm, especially for large, non-capillary pores. Thus, $K_c = \sum_{W_a}^{RDP} K(\theta)$, where W_a is an immobile soil adsorbed water capacity.

Then Eq.4 becomes:

$$K(\theta)_i = \frac{K_s}{K_c} \frac{\rho_w g r^2}{8\eta T} \frac{\Delta\theta_i}{\theta_s} \text{ ----- (5)}$$

The pore radius was taken as the largest for the class because the data was cumulated starting at the dry end and the largest radius of the smaller class is the smallest boundary for the next larger class. The K cutoff r was matched with the $\Delta\theta$ class. The larger classes cumulated the $K(\theta)$ from the smaller classes. The <10 kPa class (RDP) was calculated as the mean of the 0.1-10 kPa class.

Water flow and intrinsic permeability:

The contribution of each water filled pore class or moisture range ($\Delta\theta$) between radius r and $r + \Delta r$ to water flow (or discharge) (q) can be calculated as:

$$q = \frac{\pi \rho_w g r^4}{8\eta} \int_r^{r+\Delta r} f(r) dr \cdot \frac{dh}{dL} \text{ ----- (6)}$$

where, $\int_r^{r+\Delta r} f(r) dr = \Delta\theta$ and $f(r)$ is pore size distribution function with radii between r and $(r + \Delta r)$. By applying the function $\int_r^{r+\Delta r} f(r) dr = \Delta\theta$ for pore radii (from r_{W_a} to r_{RDP}) to the Equations 2 and 6, the water flow or discharge rate (q) [$L^3 T^{-1}$] can be calculated at saturation degree $\Delta\theta/\theta_s$ as:

$$q = \frac{\pi r^2 \rho_w g r^2 \sum_{W_a}^{RDP} \frac{\Delta\theta}{\theta_s}}{8\eta T} \frac{\Delta h}{\Delta L} \text{ ----- (7)}$$

where, the gradient, $\Delta h / \Delta L$ was set to 1, and cross section area, πr^2 was for the largest r of the class.

Taking $K(\theta) = k \cdot \rho_w g / \eta$ in consideration, the intrinsic permeability (k) can be calculated using the following relation:

$$k = \frac{r^2 \sum_{W_a}^{RDP} \frac{\Delta\theta_i}{\theta_s}}{8T} \text{ ----- (8)}$$

However, k is related to pore size distribution in soils on a way similar to $K(\theta)$, similar cutoff values and ranges, where the smaller ranges are cumulated.



Diffusivity and Water conductivity potential of soil pores:

Combining Eq.4 with the capillary rise equation (1) and at $\alpha = 0$, one obtains:

$$K(\theta)_i = \frac{\gamma r}{4\eta T\theta_s} \left(\frac{\Delta\theta_i}{\Delta h} \right) \text{----- (9)}$$

where $\Delta\theta/\Delta h$ represents inverse the slope of the soil moisture retention curve ($dh/d\theta_i$) at any segment that correspond to pore size class (i).

$D(\theta)$ [L^2T^{-1}] is defined as the ratio of the hydraulic conductivity $K(\theta)$ to the specific water capacity ($d\theta/dh$) which is considered as the slope of soil moisture retention curve at any particular water content θ .

Then Eq.9 becomes;

$$D(\theta)_i = \frac{\gamma r_i}{4\eta T\theta_s} \text{----- (10)}$$

The state of soil water is often described in energy relations. The hydraulic head pressure is the work to move pure water (Logsdon, 2003). The amount of work that required to moves a unit quantity of soil volumetric water into a pore class per unit time [$\text{erg.cm}^{-3}.\text{sec}^{-1}$ or $\text{joule m}^{-3} \text{sec}^{-1}$] can be recognized as a conductivity potential or capacity, $Kp(\theta)$.

Multiple the right term in the Eq.9 by $\rho_w g$, the $Kp(\theta)$ can be estimated as:

$$K_p(\theta)_i = \frac{\gamma\rho_w gr}{4\eta T\theta_s} \cdot \frac{\Delta\theta_i}{\Delta h} \text{----- (11)}$$

Materials and methods

Two soil profiles different in their salinity were used to apply the equations and the concepts of the study. The profiles are non-saline (I) and saline (II) heavy clay soils (~60-67% clay) located at El-Hamoul (Kafr El-Sheikh, north of the Nile Delta). The soils under investigation were planted with cotton during 2014 season and irrigated with fresh and drainage water from Terra canal (Nile river water) and from Gharbia drain respectively. The chemical analysis of irrigation waters was; EC = 0.56 and 1.68 dS/m and SAR = 2.36 and 5.63 for canal and drain waters respectively. Undisturbed soil samples were collected in steel rings and were used to determine bulk density, soil water retention curve, $h(\theta)$ with pressure heads up to 100 kPa. The $h(\theta)$ at higher pressure heads and saturated hydraulic conductivity, K_s and other standard physical and chemical analyses of the soil profiles were carried out (Table1) according to Klute, (1972), Sparks et al., (1996) and Dane and Topp, (2002). Moisture adsorption capacity (W_a) is considered an immobile water content, hence, the W_a was estimated and subtracted from $\Delta\theta$ of the >1500 kPa class. Amer, (2009) used water vapor adsorption isotherm method with applying BET equation to estimate W_a , where W_a is:

$$W_a = W_m + 2W_{me} \text{----- (12)}$$

where, W_m is the mono-adsorbed layer of water vapor on soil particles, and W_{me} is the external mono-adsorbed layer of water vapor. Soil samples of I and II profiles were taken at plantation (P) and at harvest (H) of cotton crop.

The suggested equations, 4, 5, 7, 8 and 11 were applied to determine K (hydraulic conductivity), K_s/K_c (matching factor), q water flow rate, k (intrinsic permeability), and conductivity potential, $Kp(\theta)$ for each soil site.



Table1. Standard properties of the studied clay soils.

| Soil profile & Location | Soil depth (cm) | EC [†] dS m ⁻¹ | SAR | ρ _b g.cm ⁻³ | CaCO ₃ % | OM% | Particle size distribution % | | | W _a m ³ .m ⁻³ | K _s cm/h |
|--------------------------|-----------------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|---------------------|------|------------------------------|-------|-------|--|---------------------|
| | | | | | | | Sand | Silt | Clay | | |
| I El-Hamoul (non-saline) | 0-30 | 2.72 | 7.39 | 1.14 | 7.39 | 1.53 | 15.90 | 23.87 | 60.23 | 0.1242 | 0.305 |
| | 30-60 | 3.07 | 9.50 | 1.22 | 9.50 | 0.66 | 12.30 | 24.13 | 63.57 | 0.1359 | 0.243 |
| | 60-90 | 3.48 | 10.84 | 1.15 | 10.84 | 0.45 | 10.34 | 23.90 | 65.76 | 0.1257 | 0.224 |
| II El-Hamoul (saline) | 0-30 | 5.35 | 13.52 | 1.19 | 13.52 | 2.23 | 16.40 | 21.18 | 62.42 | 0.1270 | 0.274 |
| | 30-60 | 8.32 | 14.92 | 1.18 | 14.92 | 0.35 | 12.86 | 20.22 | 66.92 | 0.1424 | 0.256 |
| | 60-90 | 7.25 | 15.70 | 1.20 | 15.70 | 0.11 | 18.55 | 16.30 | 65.15 | 0.1246 | 0.249 |

Results and discussion

Pore size distribution

The most alluvial soils in the Nile Delta have considerable swelling, particularly the area of the studied soil profiles, whereas high clay, swelling and high salinity of the soils contribute to the steeper slope in both wet-end and dry-end of water retention $h(\theta)$ function (curves) of the clay soils of northern Nile Delta (Amer, et al. 2009). Data in Tables 2 and 3 based on $h(\theta)$ function, show the capillary and non-capillary pore size classes and distribution in the studied soil profiles. The larger volume of pores corresponding to the pressure heads 0-33 kPa was found in the surface depth (0-30cm) of El-Hamoul soil profiles (I and II), indicating that the water storage pores were the minimum for this depth. The $\Delta\theta$ of *drainable pores TDP / volume pores TVP* ratio, was the maximum in the surface depth of soil profile I, ($TDP/TVP= 0.311$). The values of pore volume in the sub-surfaces 30-60 and 60-90 cm of the the profiles were higher in the saline profile II than in the non-saline one.

Amer (2001) showed that the values of storage water were different according to the distribution of pore sizes within the soil profile depth. The calculated $AWR (=WHP/WSP)$ was larger for the depths of 0 – 30 cm and 60 – 90 cm of soil profile (II) than for the same depths of the profile I. This may due to the influence of salinity in the profile II. Trends with depth were inconsistent among the soils. The overall trends were in agreement with those obtained by El-Sharkawy (1994).

Table2. Pore size distribution as a fraction of total bulk volume for El-Hamoul soil profiles I &II (at planting cotton).

| Soil profile & Location | Soil depth (cm) | RDP <10 kPa m ³ m ⁻³ | SDP 10-33kPa m ³ m ⁻³ | TDP <33kPa m ³ m ⁻³ | WHP 33-1500 m ³ m ⁻³ | CCP 10-1500 m ³ m ⁻³ | FCP >1500 m ³ m ⁻³ | TVP m ³ m ⁻³ | AWR |
|--------------------------|-----------------|--|---|---|--|--|--|------------------------------------|-------|
| I El-Hamoul (non-saline) | 0-30 | 0.0823 | 0.1215 | 0.2038 | 0.2215 | 0.3430 | 0.2292 | 0.6545 | 0.387 |
| | 30-60 | 0.0687 | 0.0867 | 0.1554 | 0.2544 | 0.3411 | 0.2510 | 0.6608 | 0.426 |
| | 60-90 | 0.0517 | 0.0926 | 0.1443 | 0.2886 | 0.3812 | 0.2321 | 0.665 | 0.289 |
| II El-Hamoul | 0-30 | 0.0710 | 0.1107 | 0.0821 | 0.2504 | 0.3611 | 0.2344 | 0.5669 | 0.420 |
| | 30-60 | 0.0687 | 0.1032 | 0.1719 | 0.2411 | 0.3443 | 0.2629 | 0.6759 | 0.397 |



| | | | | | | | | | |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| (saline) | 60-90 | 0.0700 | 0.0969 | 0.1669 | 0.2570 | 0.3539 | 0.2301 | 0.654 | 0.440 |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|

Table3. Pore size distribution as a fraction of total bulk volume for El-Hamoul cultivated soil profiles (I & II) (at cotton harvest).

| Soil profile & Location | Soil depth (cm) | RDP <10 kPa m ³ m ⁻³ | SDP 10-33kPa m ³ m ⁻³ | TDP <33kPa m ³ m ⁻³ | WHP 33-1500 m ³ m ⁻³ | CCP 10-1500 m ³ m ⁻³ | FCP >1500 m ³ m ⁻³ | TVP m ³ m ⁻³ | K _s cm/h | W _a m ³ .m ⁻³ |
|--------------------------|-----------------|---|--|--|---|---|---|------------------------------------|---------------------|--|
| I El-Hamoul (non-saline) | 0-30 | 0.0549 | 0.1281 | 0.1830 | 0.2314 | 0.3595 | 0.2398 | 0.6542 | 0.420 | 0.1299 |
| | 30-60 | 0.0689 | 0.1122 | 0.1970 | 0.2587 | 0.3868 | 0.2392 | 0.6949 | 0.322 | 0.1296 |
| | 60-90 | 0.0504 | 0.1000 | 0.1504 | 0.2734 | 0.3734 | 0.2410 | 0.6648 | 0.264 | 0.1305 |
| II El-Hamoul (saline) | 0-30 | 0.0639 | 0.1196 | 0.1835 | 0.2436 | 0.3632 | 0.2248 | 0.6519 | 0.336 | 0.1218 |
| | 30-60 | 0.0483 | 0.0865 | 0.1348 | 0.2399 | 0.3264 | 0.2477 | 0.6224 | 0.214 | 0.1342 |
| | 60-90 | 0.0352 | 0.0953 | 0.1305 | 0.2594 | 0.3547 | 0.2354 | 0.6253 | 0.202 | 0.1275 |

Saturated hydraulic conductivity:

Table 3 shows that the saturated hydraulic conductivity, K_s was low for the saline clay soil at El-Hamoul (profile II), but variability was likely very high. This is consistent with the results of Khan and Afzal (1989). They showed that K was positively correlated with pores of 1 to 33 kPa and was adversely affected by high electrical conductivity and SAR. Regarding the impact of cultivation on hydraulic conductivity, Tables 3 shows that the values of K_s of subsurface layers (30-60cm) and (60-90cm) decreased at cotton crop harvest in saline profile II, but increased in all depths of non-saline profile I. This behavior may be referring to the leaching fraction which is resulted from the increase of salinity and ESP in subsurface layers of profile II.

Unsaturated hydraulic conductivity and diffusivity:

Data in Table 4 shows the values of unsaturated hydraulic conductivity and diffusivity $D(\theta)$ as calculated by the assumed equations 4, 5 and 10 at different soil pore size classes for the surface depths of cultivated clay soil (profiles I). Numerically, $K(\theta)$ and $D(\theta)$ values at WHP, SDP, and RDP classes were higher in the surface soil depth at harvest than at planting for saline soil (profile II). This is due to the salt leaching during irrigation and cultivation practices. As expected, the values of $K(\theta)$ remain smaller in capillary pores with gradually increasing from FCP up to RDP by increasing water content. The values were $(1.67 \times 10^{-7} - 3.76 \times 10^{-12})$, $(2.75 \times 10^{-4} - 2.04 \times 10^{-8})$, $(1.98 \times 10^{-3} - 1.72 \times 10^{-6})$, and $(3.76 \times 10^{-3} - 3.11 \times 10^{-5})$ cm.min⁻¹ for FCP, WHP, SDP, and RDP respectively for the studied soils. Multiplying the values by the matching factor (K_s/K_c) resulted in numerical values a couple orders of magnitude smaller, but the trends were similar. The values of water diffusivity $D(\theta)$ were higher than those of $K(\theta)$ for all pore size classes. However, the $D(\theta)$ values decrease much less rapidly than the hydraulic conductivity as soil dries. The calculated values of $K(\theta)$ and $D(\theta)$ seem to be lying in the acceptable ranges of measured $K(\theta)$ and $D(\theta)$ for the clay soils as mentioned by Marshall and Holmes, 1979. However, it is evident that the unsaturated hydraulic conductivity equations can be applied for

fine-textured soil and incorporated flow reduction in dry soil due to the absorbed water, as well as enhanced flow through large pores in the wet soil.

Intrinsic permeability and potential conductivity:



Data in Table 4 showed that the values of the intrinsic permeability, k as calculated by Eq.8 were numerically lower in FCP (dry condition) than in RDP (saturated condition). At comparison, the k values were higher at FCP and WHP in cultivated saline soil (profile II) than non-saline profile (I). The intermediate values were similar across the soils. The same trend will be expected for water flow (discharge rate) or flux q as it is calculated by Eq.7. Overall, the used equations in calculating $K(\theta)$, $D(\theta)$, q , and k had similar results to what would be expected. The data appears useful and applicable for high clay soils that are usually ignored in PTF equations and testing. The conductivity potential, $Kp(\theta)$ may represent the discharge or flux potential, whereas the flux is defined as the volume of water flowing through a unit cross-sectional area per unit time t .

Table4. Water movement parameters as calculated by suggested equations in El-Hamoul soil profile (I) at cotton planting (P) and at harvest (H).

| Pore class | ψ kPa | P | | | | | H | | | | |
|------------|------------|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|---|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|---|
| | | $\theta_i\%$ | k cm ² | $K(\theta)$ cm/s | Ks/Kc^* K(θ) cm/s | $D(\theta)$ & $Kp(\theta)$ | $\theta_i\%$ | k cm ² | $K(\theta)$ cm/s | Ks/Kc^* K(θ) cm/s | $D(\theta)$ & $Kp(\theta)$ |
| FCP | 1500 | 22.92 | $4.16 \cdot 10^{-17}$ | 4.08_{12} | $5.58 \cdot 10^{-13}$ | $2.11 \cdot 10^{-12}$ $4.02 \cdot 10^{-9}$ | 23.98 | $4.22 \cdot 10^{-17}$ | 4.13_{12} | $5.33 \cdot 10^{-13}$ | $2.53 \cdot 10^{-12}$ $4.05 \cdot 10^{-9}$ |
| | 100 | 40.47 | $1.44 \cdot 10^{-13}$ | $1.41 \cdot 10^{-8}$ | $1.92 \cdot 10^{-9}$ | $3.85 \cdot 10^{-9}$ $3.66 \cdot 10^{-7}$ | 41.80 | $1.64 \cdot 10^{-13}$ | $1.61 \cdot 10^{-8}$ | $2.07 \cdot 10^{-9}$ | $4.32 \cdot 10^{-9}$ $3.36 \cdot 10^{-7}$ |
| | 66 | 41.86 | $1.59 \cdot 10^{-13}$ | $1.56 \cdot 10^{-8}$ | $2.13 \cdot 10^{-9}$ | $1.02 \cdot 10^{-8}$ $1.53 \cdot 10^{-5}$ | 43.03 | $1.79 \cdot 10^{-13}$ | $1.76 \cdot 10^{-8}$ | $2.27 \cdot 10^{-9}$ | $2.49 \cdot 10^{-8}$ $1.89 \cdot 10^{-6}$ |
| | 50 | 43.22 | $1.80 \cdot 10^{-13}$ | $1.76 \cdot 10^{-8}$ | $2.40 \cdot 10^{-9}$ | $7.46 \cdot 10^{-8}$ $1.76 \cdot 10^{-5}$ | 45.92 | $2.41 \cdot 10^{-13}$ | $2.36 \cdot 10^{-8}$ | $3.04 \cdot 10^{-9}$ | $1.92 \cdot 10^{-7}$ $1.46 \cdot 10^{-5}$ |
| WHP | 33 | 45.07 | $2.08 \cdot 10^{-13}$ | $2.04 \cdot 10^{-8}$ | $2.78 \cdot 10^{-9}$ | $2.24 \cdot 10^{-7}$ $1.99 \cdot 10^{-5}$ | 47.12 | $2.70 \cdot 10^{-13}$ | $2.64 \cdot 10^{-8}$ | $3.41 \cdot 10^{-9}$ | $3.11 \cdot 10^{-7}$ $2.36 \cdot 10^{-5}$ |
| SDP | 10 | 57.22 | $1.68 \cdot 10^{-11}$ | $1.65 \cdot 10^{-6}$ | $2.25 \cdot 10^{-7}$ | $4.65 \cdot 10^{-6}$ $1.62 \cdot 10^{-3}$ | 59.93 | $2.55 \cdot 10^{-11}$ | $2.50 \cdot 10^{-6}$ | $3.23 \cdot 10^{-7}$ | $6.18 \cdot 10^{-6}$ $4.69 \cdot 10^{-4}$ |
| | 5 | 59.12 | $1.97 \cdot 10^{-11}$ | $1.93 \cdot 10^{-6}$ | $2.63 \cdot 10^{-7}$ | $1.24 \cdot 10^{-5}$ $1.90 \cdot 10^{-3}$ | 61.96 | $3.10 \cdot 10^{-11}$ | $3.04 \cdot 10^{-6}$ | $3.92 \cdot 10^{-7}$ | $1.58 \cdot 10^{-5}$ $1.20 \cdot 10^{-3}$ |
| RDP | 0.1 | 65.45 | $3.17 \cdot 10^{-10}$ | $3.10 \cdot 10^{-5}$ | $4.22 \cdot 10^{-7}$ | $4.96 \cdot 10^{-5}$ $3.04 \cdot 10^{-2}$ | 65.42 | $4.60 \cdot 10^{-11}$ | $4.50 \cdot 10^{-6}$ | $5.81 \cdot 10^{-7}$ | $3.65 \cdot 10^{-5}$ $2.77 \cdot 10^{-3}$ |

The values of $Kp(\theta)$ were calculated by Eq.11 for the surface depth of soil profiles I and II. The results were found to be ranged from 10^{-9} in dry soil to 10^{-2} erg.cm⁻³.sec⁻¹ in saturated soil. Obviously, an increase in $Kp(\theta)$ occurs with increasing pore sizes, water content and hydraulic conductivity. Whatever, $Kp(\theta)$ values were higher than those for the hydraulic conductivity, diffusivity and intrinsic permeability, indicating the influence of water retention, tortuous pathways and soil pore sizes on water transfer through soil pores in plant root zone.

Conclusions

Equations were proposed to predict the hydraulic conductivity $K(\theta)$, conductivity potential, $Kp(\theta)$ of soil pores in erg.cm⁻³.sec⁻¹ or joul.m⁻³.sec⁻¹ and diffusivity $D(\theta)$ in unsaturated clay soils. The Poiseuille's equation for average velocity of water through capillary tube was the start point for driving the equations. However, the equations were based on water retention function, $h(\theta)$ and on soil pore size, where the data of pore size distribution were obtained for non-cultivated and cotton-cultivated clay soils (saline and non-saline) using water retention $h(\theta)$ data. By applying the assumed equations, the values of $K(\theta)$, $D(\theta)$, $Kp(\theta)$ and intrinsic permeability k were calculated for each pore



size class before and after cultivation. The reduction of immobile adsorbed water from water flow gives an advantage to apply the assumed equations of $K(\theta)$, $D(\theta)$, $Kp(\theta)$ and k for clay soils which have considerable adsorbed water. The values of hydraulic conductivity and other water movement parameters were influenced by water content (θ) in capillary and non-capillary pore sizes. The predicted values of $K(\theta)$, $D(\theta)$ and k into water-filled pores of the studied soils were in the acceptable ranges of measured values.

References

- Amer, A.M., 2012. Water flow and conductivity into capillary and non-capillary pores of soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, (Chile)* 12 (1), 99-112.
- Amer A.M., 2009. Moisture adsorption capacity and surface area as deduced from vapour pressure isotherms in relation to hygroscopic water of soils. *Biologia* 64, 3: 516-521.
- Amer A.M., Logsdon S.D., Davis D., 2009. Prediction of hydraulic conductivity in unsaturated soils. *Soil Sci.*, 174, 9: 508- 515
- Baver L.D., Gardner W.R., 1972. *Soil physics*. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, 498pp.
- Dane, J.H., Topp G.C. (Eds.), 2002. *Methods of soil analysis, Part 4, Physical methods*. SSSA, Madison, WI. 1692 pp.
- El-Sharkawy A.F., 1994. Study of water imbibition in soil agricultural soils. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Menoufia University, Shebin El-Kom, Egypt.
- Hillel D., 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York. 413 pp.
- Khan G.S., Afzal T., 1989. Hydraulic characteristics of some important soil series of Pakistan. pp. 222-237.
- Klute A., 1972. The determination of hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soil. *Soil Sci.* 113:4:264-276.
- Logsdon S.D., 2003. Soil water energy concepts. *Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, Inc. NY.
- Marshall T.J., 1956. Relation between water and soil. Technical Communication No. 50, Commonwealth Bureau of Soils, Farenham Royal, Bucks, England.
- Marshall T. J., Holmes J.W., 1979. *Soil physics*. Cambridge Univ. Press. London.
- Ravina I., Zaslavsky D., 1968. Non-linear electro-kinetic phenomena I: review of literature. *Soil Sci.*, 106,1:60-66.
- Sudnitsyn E.E., 1979. Soil water movement and water requirements of crops. Moscow Univ. Ezdat, Moscow.
- Sparks D.L.(Ed.), 1996. *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. ASA, SSSA, Madison, WI.
- Stakeman W.P., 1966. Determination of pore size by the air bubbly pressure method. *Proceedings of UNESCO Symposium on Water in the Unsaturated Zone:366-372*. Stakeman W.P., 1966. Determination of pore size by the air bubbly pressure method. *Proceedings of UNESCO Symposium on Water in the Unsaturated Zone:366-372*.



UDC 631.4

DEVELOPMENT OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR ESTIMATION SOIL HYDRO AND THERMAL PHYSICAL PROPERTIES

Mady A.Y¹., Shein E.V^{2,3}.

¹Faculty of Agriculture, Ain shams university, Cairo, Egypt.

ahmed_mady@agr.asu.edu.eg

²Faculty of soil science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³Soil Science Unstitute named V.V.Dokuchaev, Moscow, Pyzhevskiy per., 7, bld 2, Russian Federation

evgeny.shein@gmail.com

Annotation: Soil hydrological and thermal properties are mainly input for models of soil water and heat fluxes. Pedotransfer functions (PTFs) are the important methods used for predicting this properties. The aim of the work is to describe the unsaturated conductivity, relationships between thermal diffusivity and soil moisture by a PTFs models.

Introduction

The dynamics of soil moisture and temperature may be calculated using mathematical models, which are involving the quantitative description of the hydro and thermal-physical properties based on fundamental of soil physical parameters as predictors. Although the field measurements of soil moisture and temperature dynamics are accurate, they are time-consuming and costly. There are many problems with applying predictive mathematical models in the fields. Mathematical models and PTFs require the development of methods for the predictive mathematical model and appropriate experimental support of models for optimizing their use by increasing its efficiency and decreasing estimation of error based on soil physical properties.

Objects and methods

Objective of this study included agro-podzolic soils (Zelenograd station of the Dokuchaev Soil Science Institute, Eldigino, Pushkino district, Moscow region) (56° 08' N, 037° 48' E). Thirty soil samples with an undisturbed structure were taken from the main horizons.

Modeling saturated hydraulic conductivity

Saturated hydraulic conductivity was measured according to (Klute and Dirksen, 1986) using constant head method technique (Head and Epps, 2011) based on Darcy's law. Six different classes of PTFs (Ks-1 to Ks-6) were proposed for estimation Ks using PTFs. PTFs models were developed using nonlinear regression (NLR) and support vector machine (SVM) methods based on soil physical properties. Soil physical properties, used as independent variables, were the percentage of sand, silt, clay, soil bulk density, and organic matter. Soil samples were randomly divided into training dataset (twenty soil samples) and testing dataset (ten soil samples) for the NLR and SVM model development. Six different classes of PTFs (Ks-1n to Ks-6n) were proposed based on soil physical properties using NLR, as the flowing equations in Table 1. Parameters of SVM for Six different classes were (C) equal 100; (γ) was from 0.3 to 0.5 and (ϵ) equal 0.175.



Table 1. Proposed PTFs using NLR based on soil physical properties.

| Model | Proposed PTFs by NLR |
|-------|---|
| Ks-1n | $7.18 \times 10^{-10} \exp(-0.069 \text{ Clay} + 0.12 \text{ Sand} + 0.136 \text{ Silt})$ |
| Ks-2n | $2.23 \times 10^{-7} \exp(-0.0517 \text{ Clay} + 0.0927 \text{ Sand} + 0.102 \text{ Silt} - 2.757 \text{ B.D})$ |
| Ks-3n | $3.466 \times 10^{-9} \exp(-0.0517 \text{ Clay} + 0.0927 \text{ Sand} + 0.102 \text{ Silt} + 0.323 \text{ O.M})$ |
| Ks-4n | $2.49 \times 10^{-7} \exp(-2.2 \text{ B.D} + 0.26 \text{ O.M} - 0.0414 \text{ Clay} + 0.0742 \text{ Sand} + 0.0816$ |
| Ks-5n | Silt) |
| Ks-6n | $1.37 \times 10^{-3} \exp(-3.67 \text{ B.D} + 0.43 \text{ O.M} - 0.069 \text{ Clay})$ |
| | $1.7 \times 10^{-4} \exp(-2.75 \text{ B.D} + 0.32 \text{ O.M} - 0.0517 \text{ Clay} + 0.092 \text{ Sand})$ |

Modeling SWRC Hysteresis

Soil samples were initially saturated with water and then subjected to drying; the drying curve of the SWRC was measured first and the wetting curve was measured afterward starting from soil water potential -800 cm water, which was reached at the end of the drying phase.

Modeling soil thermal diffusivity as a function of soil moisture

Soil thermal diffusivity was measured in the laboratory using Kondratieff method at different values of water content according to Shein and Mady (2016).

Results and discussion

Modeling saturated hydraulic conductivity

The statistical data of the NLR and SVM models showed in Table 2 significant improvements in the efficiency of all PTF classes developed using the SVM method than its developed PTFs using NLR. The RMSE values for the developed PTFs by the SVM method were 1.69×10^{-6} to 8.86×10^{-7} m/s, which was appreciably smaller than for those developed by the NLR method (variation range from 2.60×10^{-6} to 1.13×10^{-6} m/s) for all classes. The reason for that due to, SVM is used for classification problems and for regression modeling, and its ability to recover strongly nonlinear dependencies in training data used for model development.

Table 2. Root Mean Square Error (RMSE), and determination coefficient (R^2) for different PTFs classes using NLR and SVM.

| NLR | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PTFs classes | Ks-1n | Ks-2n | Ks-3n | Ks-4n | Ks-5n | Ks-6n |
| RMSE, m/s | 2.60×10^{-6} | 1.98×10^{-6} | 1.50×10^{-6} | 1.13×10^{-6} | 1.20×10^{-6} | 1.25×10^{-6} |
| R^2 | 0.75 | 0.88 | 0.80 | 0.92 | 0.91 | 0.90 |
| SVM | | | | | | |
| PTFs classes | Ks-1s | Ks-2s | Ks-3s | Ks-4s | Ks-5s | Ks-6s |
| RMSE, m/s | 9.65×10^{-7} | 1.02×10^{-6} | 8.86×10^{-7} | 9.13×10^{-7} | 1.69×10^{-6} | 9.04×10^{-7} |
| R^2 | 0.85 | 0.92 | 0.93 | 0.91 | 0.77 | 0.92 |



Modeling SWRC Hysteresis

In order to estimate wetting curve from drying curve, we assumed that:

$$\theta_s^d = \theta_s^w, \quad \theta_r^d = \theta_r^w, \quad n^d = n^w, \quad \text{but } \alpha_d \neq \alpha_w$$

SWRC hysteresis (wetting curve) was calculated from drying curve by three proposed models based on linear regression as Table 3:

Table 3. Proposed PTFs for estimation wetting curve from drying curve

| PTFs models | Proposed PTFs |
|------------------------------------|---|
| M-1 | $\alpha_w = 0.13 + \alpha_d$ |
| M-2 | $\alpha_w = 2.5 \alpha_d$ |
| M-3 | $\alpha_w = 0.05 + 0.35 \alpha_d + 0.09$ (bulk density) + 0.0003 (clay content) |
| (Kool and Parker, 1987) (KP-87) | $\alpha_w = 2 \alpha_d$ |

Statistical analysis of RMSE and GMER for wetting curve represented by α_w estimated by three proposed models and the model of KP-87. Table 4 is shown that the best proposed models were M-1, M-3, M-2, and KP-87 according to the smallest values of RMSE, which were 0.05, 0.06, 0.08, and 0.085 cm^{-1} , respectively. Also according to the GMER values close to 1, which were 1.05, 0.95, 0.87, and 0.71 as Table 4. The reason of that in the developed M-1 model there was a correlation between α_w and α_d was 0.754. While in the case of M-3 there were not a correlation between α_w and each of soil bulk density and clay fraction content, the correlation values were 0.166 and 0.304, respectively.

Table 4. Values of RMSE and GMER for the three proposed models (M-1, M-2, M-3) and model KP-87.

| PTFs | M-1 | M-2 | M-3 | KP-87 |
|---------------------------|------|------|------|-------|
| RMSE (cm^{-1}) | 0.05 | 0.08 | 0.06 | 0.085 |
| GMER | 1.05 | 0.87 | 0.95 | 0.71 |

Modeling soil thermal diffusivity as a function of soil moisture

Soil thermal diffusivity at first increased rapidly with increasing water content to reach the maximum at soil moisture (0.23-0.28 g/g), then decreased at a slower rate as figure 1. We could describe the relationship between thermal diffusivity and soil moisture by \cap shaped curve using the quadratic equation according to the highest value of determination coefficient (R^2). For estimation the efficiency of the quadratic equation $K(\omega) = b_1 + b_2\omega - b_3\omega^2$, it was compared with the model of the lognormal equation suggested by Arkhangelsk (2004) KD(ARX, 2004). In order to determine which the best model between the quadratic equation and the lognormal equation, Williams-Kloot test was used. The results, demonstrated that $t_{\alpha} > 0$ was 2.8. It means and ensures that the quadratic equation



is more accurate than the lognormal equation for estimating soil thermal diffusivity in range of soil moisture (θ_r and θ_s) was $(0.12 \text{ and } 0.53) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

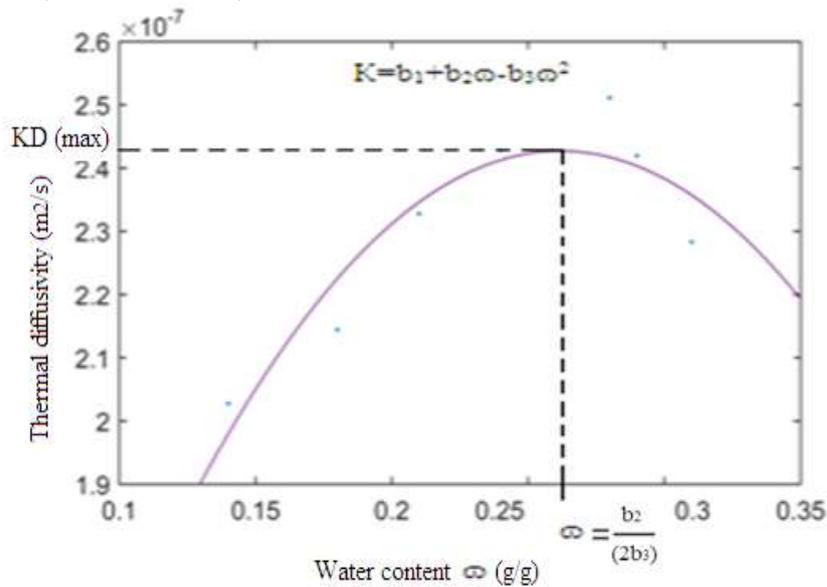


Fig.1. The relationship between soil thermal diffusivity and water content for different soil depths agro-podzolic soils.

Conclusions

Developed PTFs using SVM was more accurate than its developed PTFs using NLR for predicting K_s . The best-proposed class of developed PTFs by NLR was based on a particle size distribution, soil bulk density, and organic matter. While the best-proposed class by SVM that was taken into account a particle size distribution and organic matter. The best model can be used for estimation of wetting curve directly from drying curve, especially at lower soil potential in agro-podzolic soil $\alpha_w = 0.13 + \alpha_d$ was based on alpha of drying curve using linear regression between α_w and α_d . Also model $\alpha_w = 2.5 \alpha_d$, the factor (2.5) between α_w and α_d variant from 1.5 to 3 depend on the soil type. We could describe the relationship between thermal diffusivity and soil moisture by \cap shaped curve using a quadratic equation. The quadratic equation is a simple and faster equation used for forecasting soil thermal diffusivity for agro-podzolic soil under study.

References

- Arkhangel'skaya T.A. (2004) "A New Empirical Formula to Estimate the Thermal Diffusivity of Soil" in Proceedings of the Scientific Session on Basic Soil Science. pp. 45–46 [in Russian].
- Head, K., Epps, R. (2011) Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 2, Permeability, Shear Strength and Compressibility Test. 3rd ed. Whittles Publishing, Dunbeath Mill, 480 p.
- Klute A., Dirksen C. (1986) Hydraulic conductivity of saturated soils. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. ASA&SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 694-700.
- Kool, J. B., Parker, J.C. (1987) Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties// Water Resour. Res. Vol. 23, No.1, pp. 105–114
- Shien E. V., Mady A. Y. (2016) Soil Thermal Parameters Assessment by Direct Method and Mathematical Models // Journal of Soil Science and Environmental Management. Vol. 7, No. 10, pp.166-172.
- van Genuchten M. T.(1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils// Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 44, No.5, pp.892–898.



УДК 631.4

МОНИТОРИНГ РЕЖИМА ВЛАЖНОСТИ БУРОЗЕМОВ НА АВТОНОМНЫХ ПОЗИЦИЯХ РЕЛЬЕФА

Анциферова О.А.

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», кафедра агропочвоведения и агроэкологии, г. Калининград, Российская Федерация
anciferova@inbox.ru

MONITORING THE MOISTURE REGIME OF BROWN IN THE AUTONOMOUS POSITION OF THE RELIEF
Antsiferova O.A.

Kaliningrad State Technical University, Department of agro-soil science and Agroecology,
Kaliningrad, Russian Federation

Annotation: In 2012 - 2018 water regime monitoring was carried out on two areas of burozem (non gleyed and gleyed) on autonomous relief positions (hill tops) under conditions of the Sambian hilly moraine plain (Kaliningrad region). Soil differences were established for the duration of the period of desiccation (< lento-capillary point) and overmoistening (> field capacity) in the 0–20 cm and 0–100 cm layers. Formation of zones with critical air supply (aeration porosity below 10%) was studied.

Введение

Основной ареал распространения буроземов в Калининградской области сосредоточен в западной части региона (Самбийская и Вармийская холмисто-моренные равнины и возвышенности). До настоящего времени водный режим буроземов не изучен. Особенно актуальна эта проблема в условиях осушаемых агроландшафтов на фоне современных изменений климата.

Объекты и методы

Исследования проводились в 2012 – 2018 гг. на пахотном поле (ключевой участок «Перелески») в Зеленоградском районе Калининградской области, в пределах Самбийской холмисто-моренной равнины. Почвенный покров представляет собой чередование сочетаний окультуренных буроземов (неоглеенных, контактно-глееватых, профильно-глееватых, эродированных) на вершинах холмов с глееватыми аналогами на склонах, глеевыми в открытых понижениях и дерново-глеевыми почвами в замкнутых понижениях. В период 2012 – 2016 гг. почвы ключевого участка были выведены из пашни в связи с прокладкой газопровода, в 2017 г. – пашня с озимой пшеницей, в 2018 г. – посевы озимого рапса.

Свойства почв определяли следующими методами: гранулометрический состав по Качинскому; плотность твердой фазы пикнометрически; плотность сложения методом режущих колец (цилиндров); общая пористость и пористость аэрации - расчетными методами; максимальная гигроскопическая влажность (МГ) и наименьшая влагоемкость (НВ) – по Николаеву; влажность разрыва капиллярной связи (ВРК) принята для песков и супесей 0,6 НВ, для суглинков 0,7 НВ. Режим влажности изучался путем бурения 2 раза в месяц с послойным отбором проб каждые 10 см до глубины 1 м. Период исследований с апреля по ноябрь каждого года. Анализ полевой влажности термостатно-весовым методом с последующим пересчетом на объемную влажность. Статистическая и графическая обработка данных проведена в Excel.



Результаты и обсуждение

По современным данным среднемноголетнее количество осадков для изученной территории 781 мм. Климат соответствует приморскому. За период исследований два года выдались сырыми (2012 и 2016 гг.), один экстремально сырой (2017 г.), один слабо засушливый (2015 г.), два сухих (2014, 2018 гг.), ближе всего к среднемноголетним значениям был 2013 г. (табл. 1).

Таблица 1. Погодные условия 2012 – 2017 гг. (обработка данным метеостанции г. Калининграда)

| Показатели | Годы исследований | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Среднегодовая температура, °С | +7.7 | +8.2 | +9.1 | +9.2 | +8.9 | +8.6 | +8.9 |
| Осадки за год, мм | 977 | 798 | 631 | 715 | 921 | 1090 | 617 |
| Осадки апрель – октябрь, мм | 678 | 531 | 380 | 326 | 533 | 660 | 382 |

Изучался водный режим на двух ареалах буроземов, расположенных на автономных позициях рельефа (вершины холмов): 1) бурозем неоглеенный легкосуглинистый опесчаненный (р. 511), подстилаемый слоистым водно-ледниковым песком с глубины 180 - 190 см; 2) бурозем супесчаный глееватый (р. 486), с глубины 80 см сменяется легким суглинком. Распределение ила в профиле указывает на текстурную дифференциацию обеих почв.

Величины равновесной плотности сложения гумусового горизонта бурозема р. 511 укладываются в интервал оптимальных значений (1.26 – 1.28 г/см³), рекомендованный для легких суглинков А.Г. Бондаревым. Плужная подошва отсутствует. Общая пористость гумусового горизонта характеризуется как удовлетворительная (51 %) для пахотного слоя (по шкале Н.А. Качинского). Пористость аэрации оптимальная. Бурением установлено, что в ареале бурозема р. 511 местами встречаются песчаные прослойки с 70 см. Это приводит к быстрой фильтрации влаги в пространстве.

Плотность гумусового горизонта бурозема р. 486 значительно выше по сравнению с р. 511 и приближается к критической для пахотного слоя (1.40 г/см³). Следствием повышенной плотности является неудовлетворительная пористость в горизонте А1 (46,2%). В подпахотном горизонте развита плужная подошва (плотность около 1.6 г/см³). Иллювиальные горизонты и почвообразующая порода отличаются низкими значениями общей пористости и воздухоемкости (14% в слое 60 – 100). Накопление ила в нижних горизонтах почвы приводит к ухудшению фильтрации влаги. Вместе с тем увеличивается водоудерживающая способность заиленных горизонтов по причине утяжеления гранулометрического состава. Следовательно, несмотря на легкий гранулометрический состав почвы, в ней создаются условия для периодического скопления гравитационной влаги над заиленными горизонтами. Как показало бурение, в пространстве вокруг бурозема р. 486 располагаются глинистые прослойки, что затрудняет боковой сток влаги и приводит к ее застою в иллювиальных горизонтах почвы. Признаки слабого оглеения вскрываются в профиле с 25 см, а с 80 см почва становится сильноглееватой. Согласно мелиоративному плану почва осушается закрытым дренажем. Последняя реконструкция дренажной сети проведена в 1975 г.



Многолетний мониторинг влажности выявил существенные отличия между почвами в пределах метровой толщи (табл. 2).

Таблица 2. Количественные характеристики степени гидроморфизма буроземов на автономных позициях рельефа в условиях моренного холмистого агроландшафта Самбийской равнины (для периода апрель – октябрь)

| Показатели | Годы исследований | | | | | | | Среднее по годам |
|-----------------------------------|-------------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|------------------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| Слой 0 – 20 см | | | | | | | | |
| Период <ВРК (дни) | <u>12</u> | <u>50</u> | <u>42</u> | <u>45</u> | <u>33*</u> | <u>27</u> | <u>100</u> | <u>44</u> |
| Период >НВ (дни) | <u>0</u> | <u>11</u> | <u>30</u> | <u>30</u> | <u>0</u> | <u>30*</u> | <u>30</u> | <u>19</u> |
| Период >НВ (дни) | <u>74</u> | <u>50</u> | <u>58</u> | <u>45</u> | <u>62</u> | <u>122</u> | <u>35</u> | <u>64</u> |
| Период >НВ (дни) | <u>100</u> | <u>67</u> | <u>85</u> | <u>55</u> | <u>75</u> | <u>145</u> | <u>40</u> | <u>81</u> |
| Слой 0 – 100 см | | | | | | | | |
| Период <ВРК (дни) | <u>45</u> | <u>60</u> | <u>60</u> | <u>90</u> | <u>30</u> | <u>30</u> | <u>90</u> | <u>47</u> |
| Период <ВРК (дни) | <u>0</u> | <u>11</u> | <u>20</u> | <u>40</u> | <u>0</u> | <u>30</u> | <u>42</u> | <u>20</u> |
| Мах глубина иссушения | <u>60</u> | <u>60</u> | <u>60</u> | <u>85</u> | <u>50</u> | <u>70</u> | <u>100</u> | <u>73</u> |
| ВЗ-ВРК (см) | <u>0</u> | <u>40</u> | <u>60</u> | <u>80</u> | <u>0</u> | <u>60</u> | <u>90</u> | <u>47</u> |
| Период >НВ по всему слою 1м (дни) | <u>45</u> | <u>30</u> | <u>5</u> | <u>15</u> | <u>5</u> | <u>45</u> | <u>15</u> | <u>23</u> |
| Период >НВ по слою 1м (дни) | <u>90</u> | <u>45</u> | <u>15</u> | <u>60</u> | <u>55</u> | <u>105</u> | <u>30</u> | <u>57</u> |
| Период с ВП ниже 10 % (дни) | <u>15</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>15</u> | <u>15</u> | <u>30</u> | <u>15</u> | <u>13</u> |
| Период с ВП ниже 5 % (дни) | <u>165</u> | <u>210</u> | <u>180</u> | <u>150</u> | <u>210</u> | <u>150</u> | <u>30</u> | <u>154</u> |
| Период с ВП ниже 5 % (дни) | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>15</u> | <u>0</u> | <u>2</u> |
| Период с ВП ниже 5 % (дни) | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>0</u> | <u>27</u> | <u>105</u> | <u>60</u> | <u>15</u> | <u>30</u> |
| Глубина зоны с ВП ниже 10% | 80 - 100 | <u>Нет</u> | <u>Нет</u> | <u>70-100</u> | <u>80-100</u> | <u>70-100</u> | <u>80-90</u> | <u>70 – 100</u> |
| Глубина зоны с ВП ниже 10% | 100 | 80-100 | 80-100 | 60-100 | 70-100 | 50-100 | 80-100 | 70 – 100 |

Примечание: над чертой автоморфный (неоглеенный) бурозем (р. 511), под чертой – глееватый бурозем (р. 486). ВП – воздухоносная пористость, %.

* - для слоя 0 – 10 см.

Современный водный режим почв характеризуется ежегодным промачиванием метровой толщи, но период переувлажнения с апреля по октябрь в среднем в глееватом буроземе на 34 дня длительнее по сравнению с неоглеенным. В сырые годы глееватая почва находится в состоянии переувлажнения (выше НВ) около трех месяцев за вегетационный период.

Влажность выше НВ в горизонте или профиле почвы еще не означает однозначных условий для развития оглеения. Легкие суглинки и связные моренные супеси имеют довольно широкий интервал между НВ и ПВ. В условиях гумидного климата региона исследований превышение НВ явление типичное. Поэтому важным критерием оценки степени гидроморфизма почв является количество воздухоносных пор, которое рассчитывается как разница между общей пористостью и фактической полевой влажностью в объемных процентах для каждого тура мониторинга. При воздухоносной пористости (ВП) в профиле



(или горизонте) ниже критической отметки в 10 % возникают неблагоприятные условия для роста корней, а при отметках ниже 5% анаэробные процессы будут приводить к развитию оглеения.

Данные мониторинга влажности позволяют оценить длительность периодов с различным количеством воздухоносных пор. В автоморфном буроземе ВП ниже 10 % наблюдалась в пять лет из семи на глубине 70-100 см продолжительностью от 15 до 30 дней. Слой с ВП ниже 5 % обнаружен только в экстремально сырой 2017 год. Верховодка в метровой толще отсутствует.

В глееватом буроземе ввиду низкой пористости аэрации при влажности равной НВ, даже небольшое переувлажнение приводит к развитию зон с недостаточной воздухообеспеченностью. Поэтому в этой почве и в засушливые для региона годы наблюдается дефицит воздухоносных пор в слое 70 – 100 см. Длительность этого периода в среднем за 7 лет составила около пяти месяцев. В ноябре 2016 и 2017 гг. на глубине 110 – 120 см формировалась прерывистая в пространстве верховодка. Этим объясняется полугидроморфный характер почвы.

Выводы

1. На моренных равнинах режим влажности буроземов на автономных позициях рельефа (вершины холмов) контролируется литологическими особенностями вертикального и горизонтального залегания почвообразующих пород и распределением ила по профилю.

2. В агроландшафтах на опесчаненных легких суглинках, подстилаемых песками развиты неоглеенные автоморфные буроземы. Наличие заиленных горизонтов в профиле и глинистых прослоек в пространстве создает условия для временного избыточного увлажнения, дополнительной аккумуляции влаги и формирования глееватых буроземов.

3. В ходе многолетнего мониторинга установлены различия между неоглееными и глееватыми почвами по длительности периодов биологического иссушения (ВЗ – ВРК) и переувлажнения (выше НВ) как в пахотном горизонте (0 – 20 см), так и в метровом слое (0 – 100 см).

4. Впервые для региона определены количественные показатели гидроморфизма для автономных буроземов. Эти данные следует учитывать как при фундаментальных исследованиях (генезис, эволюция, классификация почв), так в прикладных целях (формирование запасов продуктивной влаги, эффективность удобрений, пестрота урожайности), а также при проведении дистанционного зондирования и картографирования почв и при внедрении систем точного земледелия.

12.



УДК 631.421.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ В ПОЧВАХ БОЛЬШИХ ЛИЗИМЕТРОВ МГУ

Белик А.А.^{1,2}, Кокорева А.А.¹, Колупаева В.Н.², Ежелев З.С.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

belikalexandra@gmail.com

²ВНИИ Фитопатологии, Б. Вяземы, Московская область, Российская Федерация

PREDICTION OF PESTICIDE MIGRATION IN SOILS OF LARGE LYSIMETERS OF MOSCOW STATE UNIVERSITY

Belik A.A.^{1,2}, Kokoreva A.A.¹, Kolupaeva V.N.²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute of Phytopathology, Bolshie Vyazemy, Moscow reg., Russia

Annotation: The investigation of pesticide migration in soil is an essential step for environmental hazard assessment. Soil lysimeters are intermediate between laboratory and field methods, allowing to obtain unique experimental data: pesticide content in soil profile and especially removal of substances with runoff.

Введение

Правильное обращение с пестицидами и предотвращение их выноса в грунтовые воды требует тщательного изучения их миграции в профиле почвы. Полученные в ходе экспериментов данные могут использоваться как для принятия конкретных решений, так и для настройки физически обоснованных моделей, позволяющих прогнозировать поведение веществ при различных вариациях почвенно-климатических условий.

Подвижность пестицидов возможно исследовать с помощью лабораторных, лизиметрических и полевых методов, каждый из методов имеет свои недостатки и преимущества (Сметник и др., 2005). Лизиметры представляют собой промежуточное звено между полевыми и лабораторными методами, условия в них максимально приближены к реальным: влияние сезонных изменений, возможность многолетних исследований, наличие преимущественных потоков, которые сложно учесть при колоночных экспериментах ввиду малого масштаба. Однако в отличие от полевых экспериментов возможно учитывать условия на верхней и нижней границах профиля и получить экспериментальные данные по выносу веществ из почвы с лизиметрическим стоком (Katagi, 2013, Шеин и др. 2009).

Объекты и методы

Большие Лизиметры почвенного стационара МГУ

В 2015 году на дерново-подзолистой почве Больших лизиметров МГУ им. М.В. Ломоносова (размер 2,8 x 2,8 x 1,75 м) был начат деляночный эксперимент по миграции среднеподвижного ($K_{oc}=241$ см³/г) и среднестойкого ($DT_{50}=34$ сут.) пестицида циантринилипрола. Внесение пестицида проводилось дважды: весной 2015 и весной 2016 в дозах 3 кг/га и 3,2 кг/га соответственно. Основные свойства горизонтов почвы представлены в таблице 1. Параметры аппроксимации лабораторных определений методами капилляриметров и равновесия над насыщенными растворами солей основной гидрофизической характеристики (ОГХ) функцией ван Генухтена с использованием модели RETC представлены в таблице 2. Данные по свойствам почвы и параметрам ОГХ для слоев ниже 20 см взяты из литературных данных (Умарова и др., 2002).



Образцы почвы для определения остаточных количеств пестицида отбирали буровым методом через 0, 92, 351, 360 (вторая обработка), 476 и 688 суток после первичной обработки почвы пестицидом с шагом по вертикали 5 см, составляя из 10 индивидуальных 2 смешанных образца, в которых определяли содержание пестицида с помощью жидкостной хроматографии. Кроме того на опытном поле были установлены термодатчики на глубинах 5, 15 и 30 см, которые фиксировали температуру почвы каждый час, ежедневно фиксировался объем стока с нижней границы профиля с помощью автоматизированной системы с точность 2 мл, периодически отбирались лизиметрические сточные воды и определялась концентрация пестицида в них, а также для каждого срока отбора почвы определялась послойно влажность почвы термостатно-весовым методом.

Таблица 1. Свойства дерново-подзолистой почвы Больших лизиметров МГУ

| Горизонт, глубина, см | Песок | Пыль | Глина, | Плотность почвы кг/м ³ | рН | Сорг, % | Кф м/сут |
|--------------------------|-----------|---------------|----------|---|------|------------|-------------|
| | 0,05-2 мм | 0,002-0,05 мм | <0,002мм | | | | |
| | % | | | | | | |
| A, 0-10 | 3.87 | 84.83 | 11.30 | 1120 | 5.81 | 2.52 | 0.70 |
| A, 10-20 | 3.52 | 85.25 | 11.23 | 1280 | 5.82 | 1.70 | 0.70 |
| A2, 20-40 | 3.2 | 89.8 | 7.0 | 1350 | 5.73 | 0.77 | 0.54 |
| B1, 40-60 | 4.9 | 87.8 | 7.3 | 1490 | 5.73 | 0.65 | 0.36 |
| B2, 60-80 | 5.8 | 87.0 | 7.2 | 1500 | 4.50 | 0.60 | 0.18 |
| B3, 80-100 | 16.7 | 76.5 | 6.8 | 1560 | 4.50 | 0.81 | 0.08 |

Таблица 2. Параметры аппроксимации ОГХ уравнением ван Генухтена

| Горизонт, глубина, см | θ_r , м ³ / м ³ | θ_s , м ³ / м ³ | n | α , см ⁻¹ |
|--------------------------|--|--|---------|-----------------------------|
| A, 0-10 | 0.0005 | 0.3921 | 1.30942 | 0.0045 |
| A, 10-20 | 0.0005 | 0.3813 | 1.30541 | 0.0035 |
| A2, 20-40 | 0.0001 | 0.4360 | 1.0195 | 0.0269 |
| B1, 40-60 | 0.0004 | 0.4253 | 1.2619 | 0.0191 |
| B2, 60-80 | 0.0007 | 0.4355 | 1.2568 | 0.0215 |
| B3, 80-100 | 0.0001 | 0.4271 | 1.2601 | 0.018 |

Модель PEARL 4.4.4

Модель PEARL 4.4.4 физически обоснованная модель, которая активно применяется при процедуре регистрации пестицидов в России, стандартные сценарии разработаны ВНИИ фитопатологии. PEARL имеет блочный принцип устройства и для описания движения воды



использует другую модель – SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant), в которой к конвективно-диффузионному переносу добавлен транспорт по макропорам (пользователю не доступна параметризация преимущественного транспорта), а поровое пространство поделено на 2 домена: 1 – поры, продолжающиеся на протяжении всего профиля, "main bypass domain", и 2 – поры, заканчивающиеся на разных глубинах, "internal catchment domain" (Berg et al., 2016; Shein et al., 2018).

Результаты и обсуждение

Глубина миграции циантрилипрола в почвенном профиле составила 40 см в первый год эксперимента, остаточное содержание в профиле на 351 сутки составляет 47% от дозы внесения. Во второй год после внесения пестицид мигрирует глубже, отбор образцов проводился до 50 см, и во всех слоях был обнаружен циантрилипрол. К концу эксперимента на 688 сутки в профиле было обнаружено 44% пестицида от повторного внесения (рис. 1). Максимальное содержание наблюдалось в верхнем 10 см слое лизиметра.

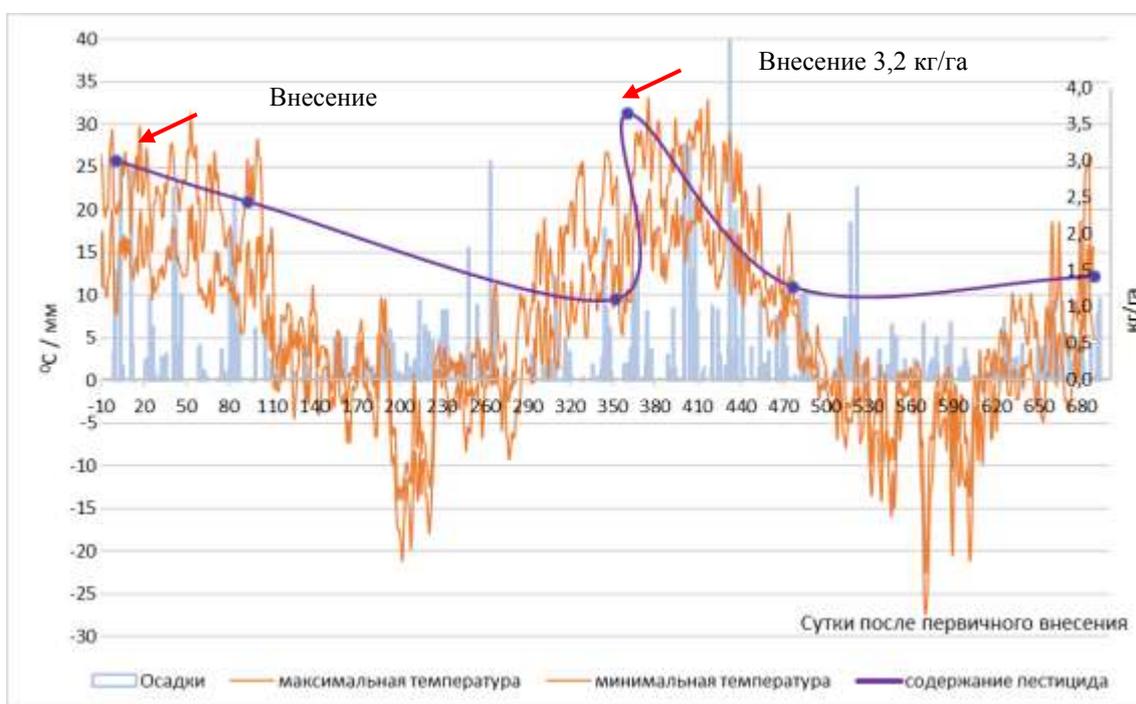


Рис.1. Динамика содержания пестицида и климатические данные

Для параметризации модели PEARL необходимы начальные условия, условия на нижней и верхней границах и экспериментальное обеспечение (физические и химические свойства почв, токсикантов). Почвенное экспериментальное обеспечение введено в модель на основе указанных выше лабораторных и полевых определений свойств почвы по горизонтам (табл. 1, табл. 2). Данные по физико-химическим свойствам пестицида циантрилипрола взяты из европейского отчета о веществе (Conclusion on the peer review..., 2014), период полураспада был заменен на $DT_{50}=49,9$ суток, который определен ВНИИ Фитопатологии непосредственно для исследуемого нами типа почвы. В качестве условий на верхней границе почвы были взяты ежедневные климатические данные, предоставленные Метеостанцией МГУ.

В почве параллельно с процессом миграции идет разложение пестицида, на которое сильно влияет температура почвы, поэтому необходимо знать, насколько точно модель по климатическим данным прогнозирует температуру почвы. Визуальное сравнение расчетных



данных с показаниями термодатчиков (летний период 2015 года) и ошибка прогноза показывают хорошую сходимость прогноза и эксперимента (рис. 2). Прогнозная сила возрастает с глубиной, если не учитывать первые 7 дней, когда наблюдаются существенные отличия между прогнозными и реальными значениями, обусловленные нарушением почвы в следствие установки термодатчиков, то нормированная средняя квадратическая ошибка (SRMSE) для 5 см равна 0,079 и для 15 см – 0,002.

Миграция веществ в почве связана с движением воды, поэтому важно оценить, насколько точно модель прогнозирует количество лизиметрического стока. Сравняя расчетные и экспериментальные данные (рис. 3), можно утверждать, что модель PEARL хорошо справляется с прогнозированием стока для летнее-осеннего периода, однако искажает реальную картину для зимнего времени, когда сток с нижней границы профиля практически прекращается, а также периода снеготаяния, когда резко возрастает количество стока. Модель сглаживает ступенчатость графика.

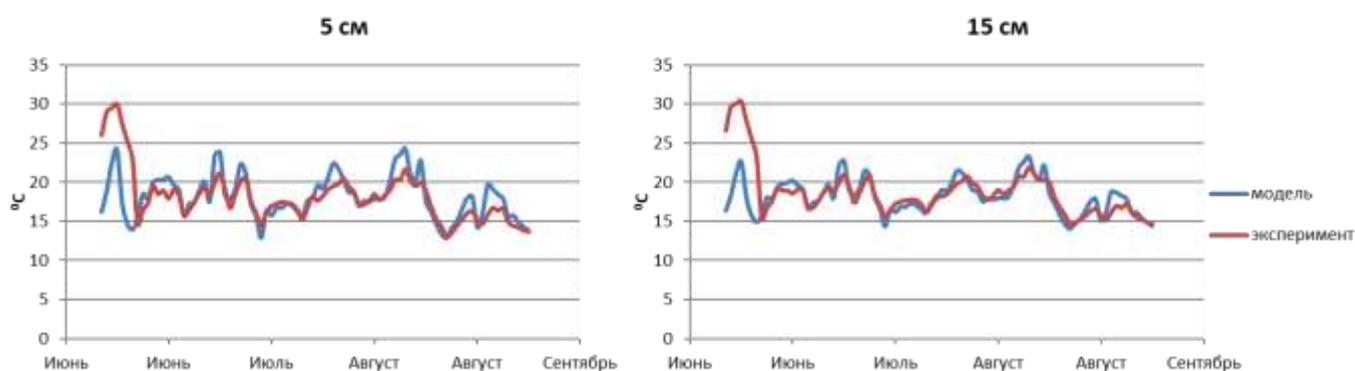


Рис.2. Сравнение экспериментальных и прогнозных температурных данных 2015г.



Рис.3. Сравнение экспериментального и прогнозного кумулятивного лизиметрического стока

Циантринилипрол был обнаружен в стоке через 2 недели после внесения в почву, этому способствовало выпадение нескольких ливней с нормой осадков более 20 мм. Содержание пестицида в водном стоке в концентрации ниже предела обнаружения метода анализа было отмечено за первый год эксперимента в 20% образцов, после повторного внесения пестицида во второй год исследования циантринилипрол не был обнаружен только в двух образцах (рис. 4). По всей видимости, в 2015 г. и начале 2016 г. мы наблюдали отдельные проскоки вещества



за пределы почвенного профиля, тогда как после мы видим постоянный вынос пестицида из лизиметра, что скорее всего свидетельствует том, что фронт движения пестицида достиг нижней границы лизиметра. Модель PEARL не справилась с моделированием данного блока, полностью исключая вынос пестицида в сток, лишь в конце второго года наблюдаются следовые (близкие к 0) количества пестицида в стоке.

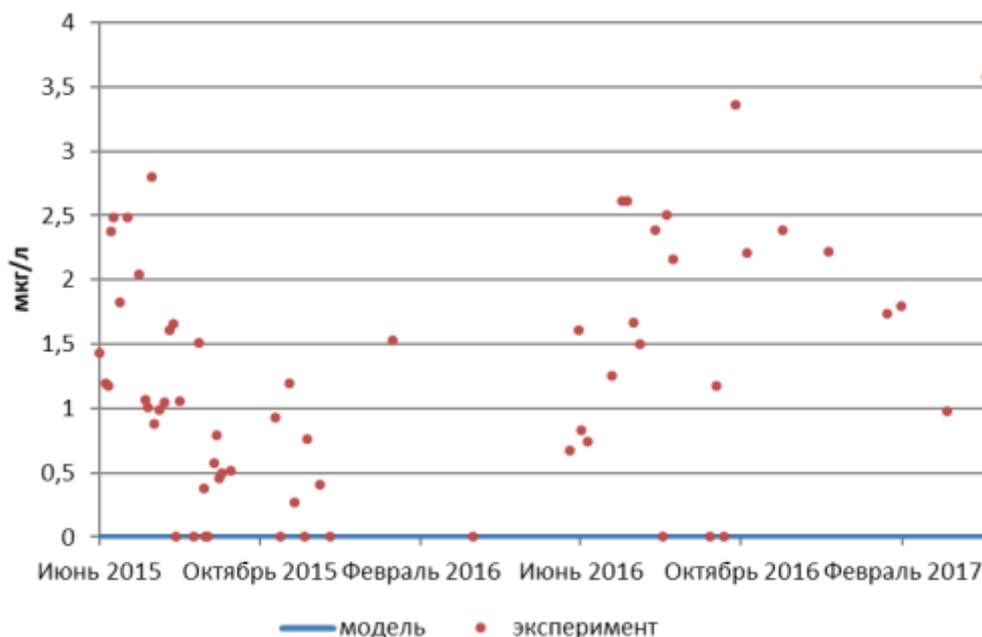


Рис.4. Сравнение экспериментальных и прогнозных концентраций циантранилипрола в стоке

Прогноз занижает содержание пестицида в профиле почвы, особенно хорошо это прослеживается для верхнего 10 см слоя почвы (рис. 5). К концу второго года эксперимента модель предсказывает миграцию пестицида на глубину 50 см, как и в эксперименте, однако концентрации очень малы. Ошибка суммарного содержания пестицида в профиле за все время эксперимента равна 0,345, но для слоев ниже 40 см SRMSE достигает 2.

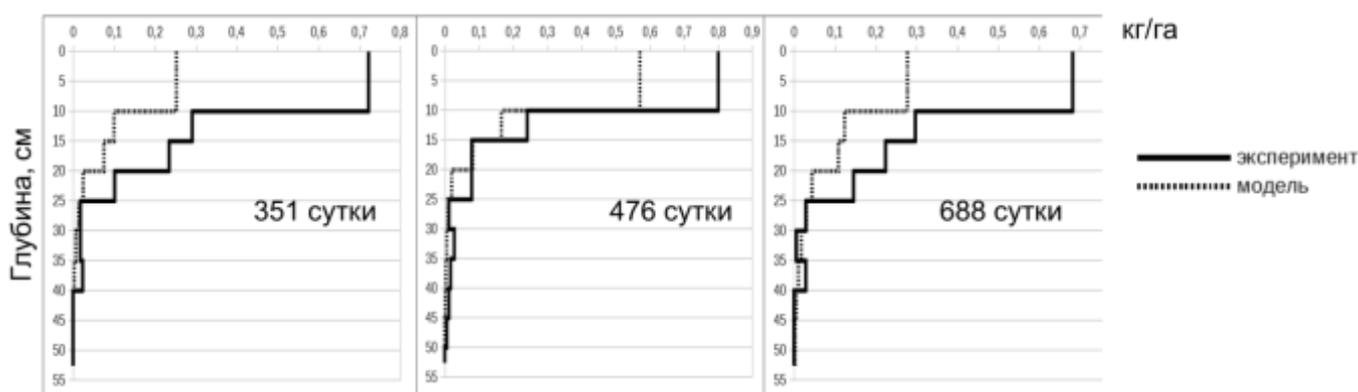


Рис.5. Сравнение экспериментальных и прогнозных концентраций циантранилипрола в почве

Выводы

Модель PEARL хорошо справляется с прогнозированием температурного и водного режимов, однако допускает существенные ошибки при прогнозировании поведения циантранилипрола в почве. Поэтому требуется настройка модели или поиск новых



инструментов для минимизации риска неблагоприятных последствий в следствие неточного прогноза.

Благодарность

Работа выполнена по теме Госзадания № 0598-2014-0011 в ФГБНУ ВНИИФ и при поддержке гранта РФФИ 18-34-00801 мол_a.

Литература

1. Berg, F. van den; Tiktak, A.; Boesten, J.J.T.I.; Linden, A.M.A. van der PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment. WOt-technical report 61, 2016. P. 134.
2. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance cyantraniliprole // EFSA Journal. 2014. Vol 12. No 9. P. 249
3. Katagi T. Soil Column Leaching of Pesticides // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 221. 2013. P. 1-105.
4. Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaeva V.N. Quantitative Estimate of the Heterogeneity of Solute Fluxes Using the Dispersivity Length Parameter for Mathematical Models of Pesticide Migration in Soils // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 7. P. 797–802.
5. Сметник А.А., Спиридонов Ю.Я., Шеин Е.В. Миграция пестицидов в почвах. М.: РАСХН-ВНИИФ, 2005. 327 с.
6. Умарова А.Б., Шеин Е.В., Архангельская Т.А. Особенности формирования элементов водного режима дерново-подзолистых почв в годовой, сезонной и суточной динамике // Вестник Московского университета. Серия 17. 2002. С. 36-42
7. Шеин Е.В., Кокорева А.А., Горбатов В.С., Умарова А.Б., Колупаева В.Н. Оценка чувствительности, настройка и сравнение математических моделей миграции пестицидов в почве по данным лизиметрического эксперимента. Почвоведение. 2009. № 7. С. 826-835



UDC 631.437

СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ПОЧВЕ

Болотов А. Г.¹, Шеин Е. В.²

¹РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева
agbolotov@gmail.com

²МГУ имени М. В. Ломоносова

MEANS OF MONITORING HYDROLOGICAL MODES IN SOIL

Bolotov A.G.¹, Shein E.V.²

¹Russian State Agrarian University-Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Moscow, Pryanishnikova st., 12
agbolotov@gmail.com

²Faculty of Soil Science of MSU, Moscow, Russian Federation

Annotation: В статье изложены теоретические основы измерения гидрологических режимов в почве, с помощью современных цифровых систем сбора информации. Приведено описание созданного макетного образца информационно-измерительной системы для измерения влажности почвы.

Введение

Для изучения жизни системы, для принятия определенных управленческих решений, для контроля стабильности работы системы, для решения многих других вопросов, принято использовать метод мониторинга окружающей среды, т.е. систему методов постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в интересующем нас объекте окружающей среды (Мониторинг, 2015). При этом, уже обладая рядом знаний об объекте исследования, ведя контроль его состояния, контроль динамический непрерывный, важно сразу давать оценку состояния этого объекта, понимать, какие именно показатели состояния системы являются классификационными, понимать, где находятся реперные точки состояния системы, переводящие ее на разные уровни стабильности.

Таковыми показателями могут служить различные параметры окружающей среды. Например, температура, влажность, давление и пр. Любая работа в области природоохраны, метеорологии, экологии и естествознания динамика изменения этих параметров окружающей среды может использовать режимные наблюдения для обоснования своих положений.

Возрастающая, в последнее время, частота неблагоприятных метеорологических явлений только усиливает актуальность мониторинга метеорологических параметров ландшафта в режиме реального времени. Особенно это касается мониторинга гидрологического режима почвы, т.к. усиливающаяся разомкнутость глобального гидрологического цикла вызывает беспокойство и интерес со стороны специалистов различного профиля.

Приборная база по контролю температурного и водного режима почв

Существуют две группы измерительных приборов: 1) приборы позволяющие измерять необходимые величины в ручном режиме, требующие наличие человека. Как правило, это шкаловые приборы. 2) приборы, не требующие наличия экспериментатора, и измеряющие физические величины в автоматическом режиме, в режиме реального времени, либо в режиме записи. К данному типу измерительных устройств относятся регистраторы данных (Data



Logger, логгер) – компактный прибор, позволяющий регистрировать физические параметры различных процессов в реальном времени.

Одними из наиболее часто используемых датчиков температуры в так называемых «off line» измерениях за последнее десятилетие стали датчики Термохрон (температурные часы). Термохрон позволяет регистрировать температурные значения с задаваемым заранее шагом по времени. Полученная информация по температуре записывается в собственной энергонезависимой памяти. Устройство этого миниатюрного датчика таково, что система измерения и записи устойчива к внешним воздействиям среды. Что позволяет оставлять его на длительный срок в почве с целью фиксации в автономном режиме температуры окружающей его среды.

Другой тип регистратора данных RC-4 (Data Logger) позволяет также регистрировать физические параметры различных процессов в реальном времени. Существует модификация даталоггера в форме стационарного прибора или более компактного ручного измерителя. Все устройство состоит из двух частей – основное цифровое устройство с микропроцессором, которое обрабатывает преобразованные цифровые данные. Вторая часть регистратора – собственно чувствительный элемент – датчик, который фиксирует исследуемые характеристики среды (почвы). От него данные поступают в микропроцессор, а затем предоставляются пользователю через экран с одновременной записью во внутреннюю энергонезависимую память прибора. Даталоггер может напрямую передавать цифровую информацию на необходимое заданное оборудование. При этом, в зависимости от полученных показателей, это оборудование в автоматическом режиме может управлять наблюдаемыми параметрами.

Датчики, позволяющие вести учет водного режима почв, называются цифровыми тензиометрами, где в качестве регистрирующего элемента используется электронный датчик давления. Аналоговая величина давления переводится аналого-цифровым преобразователем в цифровой код и выводится на дисплей или передается в компьютер.

Цифровой тензиометр (Blumat Digital Pro plus, Австрия) состоит из керамической свечи, измерительного блока с дисплеем и батареей питания. Имеет одну кнопку управления, позволяющую включать прибор и производить выбор единиц измерения. Данный тензиометр является полностью автономным прибором, который можно использовать в полевых условиях, для измерения давления почвенной влаги. Диапазон измерения давления 10-750 mBar (или приблизительно от 0.01 до 0.75 атм, или от 10 до 770 см водного столба, т.е. можно считать, что тензиометр в данной конструкции дает показания в см водного столба). Питание прибора производится от литиевой батареи 3В CR2032. Длина тензиометра составляет 24 см. Длина рабочей части, погружаемой в почву, равна 18 см - в случае применения тензиометра как индикатора полива растений, например в теплицах, или в открытом грунте, где необходимо следить за давлением влаги на глубине около 20 см, в зоне распространения корней. При целевых исследованиях распределения давления влаги по профилю почвы тензиометр легко переоборудуется в прибор с удлиненной пластмассовой рабочей частью, в которую вставляется вакуумный пластмассовый шланг. Для этого пластмассовая рабочая часть тензиометра разрезается (примерно в 5-15 см от керамического фильтра), и рабочая часть тензиометра с измерительной головкой соединяется пластмассовым вакуумным шлангом с пластмассовым стержнем с впрессованным в него керамическим фильтром. Длина тензиометра увеличивается на длину вставленного пластмассового шланга. Длина тензиометра соответствует длине соединительного шланга совместно с длиной исходного тензиометра с керамическим фильтром. Тензиометр удлиняется на величину длины вставки из вакуумного шланга. В этом случае, тензиометр можно ставить в пробуренную скважину



(или в почвенный разрез на требуемые глубины, например, 10, 20, 30, 50, 80 см (или другие) необходимые вплоть до глубины помещения керамического датчика).

Измерение влажности почвы, как правило, проводится с помощью диэлькометрических датчиков TDR (Time Domain Reflectometer). Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в конкретной среде меньше, чем в вакууме, для которого $\epsilon=1$. Отличие проницаемости от единицы обусловлено эффектом поляризации диэлектрика под действием внешнего электрического поля, в результате которой создаётся внутреннее противоположно направленное поле. В области низких частот значение проницаемости реальных сред обычно оно лежит в диапазоне 1–100. Эта величина зависит от частоты электрического поля – обычно высокочастотная диэлектрическая проницаемость ниже статической. В среде, где имеются диэлектрики, имеет место, происходит переориентация диполей под действием электрического поля. Этот процесс занимает некоторое время, зависящее, прежде всего от количества диполей диэлектрической среды. В почве – это количество воды. На этом основан принцип работы диэлектрических датчиков, основанных на скорости прохождения электромагнитной волны. Итак, основной принцип работы датчиков, использующих принцип измерения скорости прохождения электромагнитной волны в дисперсной увлажненной (трехфазной среде), заключается в том, что электромагнитный импульс будет распространяться вдоль зондовых стержней со скоростью, зависящей от диэлектрической проницаемости материала, окружающего линию стержней. По мере увеличения содержания воды скорость распространения электромагнитного сигнала уменьшается, поскольку поляризация молекул воды требует времени. Измеряется время прохождения приложенного сигнала дважды по длине стержня, – по линии стержня и обратно. Сигнал перемещается по длине зонда и, отразившись от конца, возвращается назад к головке зонда. Часть схемы обнаруживает отражение и запускает следующий импульс. Частота пульсации при расположении зондовых стержней в воздухе составляет около 70 МГц.

Информационно-измерительная система мониторинга влажности и температуры почвы

В комплексных гидрологических исследованиях широкое распространение получили наблюдения, которые проводятся на нескольких точках. Основной принцип таких наблюдений – одновременность определения гидрологических параметров. Программа наблюдений включает измерение температуры воздуха и почвы, абсолютной и относительной влажности воздуха, давления, скорости и направления ветра, количества и интенсивности осадков, испарения, влажности почвы и уровня грунтовых вод. Для выполнения данной программы нужны многолетние круглогодичные наблюдения над протекающими в природе процессами, выполняемые в рамках стационарных исследований. Многолетние наблюдения в условиях стационаров дают надёжный материал для установления зависимостей сезонной ритмики и динамики гидрологических параметров, позволяют судить об их развитии во времени. При этом эти исследования весьма трудоёмки и требуют большого количества измерений, что ограничивает их применение. Поэтому на практике чаще всего ограничиваются полустационарными исследованиями, которые представляют собой непродолжительные повторные наблюдения, не дающие полного представления о природных режимах в геосистемах.

С появлением современных недорогих информационно-измерительных систем появилась возможность экспериментального определения метеопараметров в стационарных



исследованиях. При этом измерение температуры воздуха/почвы и влажности воздуха, а также других параметров, характеризующих состояние атмосферы, реализуемо с помощью доступных технических средств. Тем не менее, измерение влажности почвы вызывает определенные трудности: недорогие электронные датчики влажности почвы не отвечают требованиям точности и стабильности показаний. В связи с этим ряд авторов (Полуэктов с соавт., 2003) считают, что при отсутствии стандартных методов оперативного on-line измерения влажности почвы в реальных условиях ландшафта, единственным надежным способом получения информации о процессах увлажнения и иссушения почвы является расчетный метод с использованием тех или иных математических моделей.

По нашему мнению, наибольшую перспективу имеет применение совокупности современных программных (информационных) математических средств моделирования почвенного и атмосферного тепловлагопереноса и измерительных систем, позволяющих получать экспериментальные значения граничных и начальных условий расчетных схем. Такой подход позволит значительно сократить долю инструментальных ресурсов при получении метеорологической информации без потери точности и минимизации работы по экспериментальному обеспечению входных параметров (Болотов, 2017).

Нами создан макетный образец, являющийся основой распределенной сети интеллектуальных датчиков, на основе так называемых «облачных» технологий. Данный макет включает все иерархические уровни информационно-измерительной системы – от датчика до пользователя (клиента). В качестве первичного преобразователя выбран датчик влажности и температуры SM3001 (КНР), который погружается в почву и может быть использован при долгосрочном мониторинге данных параметров в режиме реального времени. Измерительная схема расположена в герметичном неразборном водонепроницаемом корпусе с тремя измерительными стальными иглами-зондами. Диапазон измерения влажности 0-60% (регулируемый от 0 до 100%), погрешность измерения влажности почвы 2%, время измерения одна секунда, частота измерения 100 МГц. Диапазон измеряемых температур $-40...85^{\circ}\text{C}$ с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$ и погрешностью $0,5^{\circ}\text{C}$. Выходная информация может быть представлена в аналоговом виде через напряжение или ток в зависимости от конфигурации прибора. Также существует модификация прибора с цифровым интерфейсом RS-485 на основе протокола Modbus RTU. Нами был выбран последний вариант, т.к. он позволяет соединять датчики в единую сеть по двухпроводной линии, что весьма удобно при мониторинге температуры и влажности профиля почвы. Диапазон адресов устройств можно задавать в пределах 1–250. Передаваемые значения температуры и влажности можно масштабировать и проводить процедуру смещения данных при калибровке.

Для подключения датчиков по GPRS-каналу к «облачному» сервису (OWENCLOUD..., 2018) использован сетевой шлюз со встроенным интерфейсом RS-485. Условия эксплуатации – температура окружающего воздуха от -40 до $+55^{\circ}\text{C}$. При запуске прибор инициализирует GPRS-соединение с использованием точки доступа (APN), заданной пользователем или установленной по умолчанию. После установки GPRS-соединения прибор соединяется с сервером по доменному имени или по IP-адресу, установленному производителем. Если соединение с сервером не устанавливается с четырех попыток, шлюз перезагружается. После установки соединения прибор переходит в режим ожидания команд от сервера и передачи их в линию RS-485. При этом прибор получает данные из линии RS-485, запоминает их в буфере и передает на сервер. Автоматическая перезагрузка шлюза производится один раз в 12 часов, начиная со времени включения, кроме случаев, когда шлюз имеет активное соединение с



сервером и производится передача данных. Облачный сервис предоставляет пользователям следующий функционал: сбор и хранение данных с приборов, отображение информации на графиках и таблицах, а также её экспорт формат других табличных процессоров (Excel). Важным свойством сервиса является отражение функционирующих приборов на карте, что позволяет оперативно получать метеорологические параметры интересующего ландшафта или геосистемы.

Тестовые испытания созданного макетного образца информационно-измерительной системы подтверждают правильность выбранного подхода. Приборы данной системы могут легко тиражироваться и, при наличии подробной инструкции, эксплуатироваться специалистами в области гидрологических исследований.

Литература

1. Болотов А.Г. Гидрофизическое состояние почв юго-востока Западной Сибири: дисс. ... доктора биол. наук. М., МГУ им. М. В. Ломоносова, 2017. 351 с.
2. Мониторинг // Гражданская защита: Энциклопедия в 4-х томах. Т. II (К - О) - М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015
3. Полуэктов Р.А., Опарина И В., Терлеев В.В. Оперативный расчет и прогноз динамики почвенной влаги // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации. 2003. С. 241–244.
4. OWENCLOUD – Заголовок с сайта // <https://owencloud.ru/site/login>.



УДК 631.423.2:631.425.7:630*114.12

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕМКОСТНЫХ ВЛАГОМЕРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЛАЖНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

Быховец С.С.¹, Шашков М.П.¹, Фролов П.В.¹, Зубкова Е.В.¹, Иванова Н.В.^{1,2}, Шанин В.Н.^{1,3}

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пушкино, Российская Федерация

s_bykhovets@rambler.ru

² Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Пушкино, Российская Федерация

³ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Российская Федерация

ON THE USE OF CAPACITIVE MOISTURE METERS FOR MONITORING THE MOISTURE OF FOREST SOILS

Bykhovets S.S.¹, Shashkov M.P.¹, Frolov P.V.¹, Zubkova E.V.¹, Ivanova N.V.^{1,2}, Shanin V.N.^{1,3}

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

² Institute of Mathematical Problems of Biology of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

³ Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Annotation: The calibration curves of three capacitive soil moisture meters were investigated. Possibilities of their use for monitoring the moisture of forest soils are discussed, and some recommendations are given.

Введение

При решении задач параметризации и верификации математических моделей лесных экосистем мы сталкиваемся с необходимостью получения данных о пространственной неоднородности и временной изменчивости количественных характеристик экологических факторов, в числе которых важное место занимает влажность почвы. Принципиальная особенность решаемых нами задач – исследование пространственной неоднородности, и в частности – специфических условий локальных местообитаний отдельных видов растений. Традиционный подход к мониторингу влажности почвы, основанный на термостатно-весовом методе, весьма трудоемок, трудноосуществим в полевых условиях вдали от лаборатории, а главное – неоднократный отбор проб в конкретных микро-местообитаниях может привести к существенному нарушению локальных условий. Поэтому перед нами стоит задача выбора приборов и методов, позволяющих проводить регулярные измерения и/или автоматическую регистрацию влажности почвы с минимальным нарушением естественного состояния растительного покрова и почвы.

У нас имеется опыт работы с рядом серийных приборов, основанных на емкостном принципе. Но, к сожалению, часто в инструкциях приборов, ориентированных на прикладное использование, принципы их работы описаны слишком лаконично, а физический смысл непосредственно измеряемых величин не всегда явно определен. Т.е., на выходе получаем не емкость или диэлектрическую проницаемость, и тем более – не фактическую влажность, а абстрактные «условные» величины, требующие пересчета во влажность, или же получаемые по встроенным градуировкам значения с размерностью влажности, которые без коррекции градуировки применительно к конкретной почве часто тоже можно рассматривать лишь как «условные величины». В таком случае построение градуировок является скорее технической задачей, а их теоретическая интерпретация затруднена. Тем не менее, опыт и такой работы может быть полезным при дальнейшем использовании подобных приборов.



Объекты и методы

Влагомер грунта МГ-44

Влагомер грунта (электронный цифровой измеритель влажности почвы) МГ-44 производства ООО «Весомизмеритель» (Харьков, Украина) предназначен для измерения влажности почв и грунтов при помощи радиочастотного датчика. Согласно инструкции по эксплуатации (Влагомер..., 2009), предел основной абсолютной погрешности $\pm 1\%$ во всем диапазоне измерения влажности (0–100%). Прибор выпускается в двух модификациях: МГ-44, с 4-электродным игольчатым датчиком для измерений в слое 0–5 см; и МГ-44Э, с датчиком в виде щупа-зонда длиной 50 см. Приборы снабжены несколькими (2–5) предустановленными заводскими градуировками, и позволяют вводить до 99 пользовательских. Однако предлагаемая разработчиком методика калибровки не вполне удобна, так как предполагает использование образцов с известной на момент измерений влажностью, вводимой в память прибора одновременно с запоминанием результата измерения. Причем, градуировки, создаваемые встроенным программным обеспечением (ПО) прибора – кусочно-линейные, состоят из линейных отрезков, соединяющих индивидуальные экспериментальные точки. Это могло бы иметь смысл, если бы случайные ошибки единичных измерений, выполняемых в процессе градуировки, были пренебрежимо малыми, чего в реальности обычно не бывает. Более предпочтительной представляется аппроксимация экспериментальных данных сглаженными кривыми.

Влагомер MS350A

Емкостной влагомер (высокочастотный измеритель влажности) MS350A производства КНР предназначен для измерения содержания влаги в почве и сыпучих веществах. Согласно инструкции (Moisture..., 2015), диапазон измерений составляет 5–85 % при температуре 0 – +60°C; при разрешении 0.1%, и точности $\pm(1+0.005*n)\%$. Датчик – щуп-зонд длиной 30 см. Прибор снабжен 20-ю встроенными шкалами. Но инструкция не содержит явной информации об их назначении (калибровка сводится к выбору наиболее подходящей из имеющихся шкал, но без дополнительной коррекции это не обеспечивает заявленной точности 1–1.5%). Поэтому, нами использовалась предлагаемая «по умолчанию» встроенная шкала Cd09 (диапазон значений 0–99.9), с дополнительной градуировкой – построением экспериментальной зависимости между показаниями прибора (рассматриваемыми в качестве промежуточных «условных» единиц), и фактической влажностью почвы.

Датчик влажности почвы Spectrum WaterScout SM100

Датчики влажности почвы WaterScout SM100 (2011) фирмы Spectrum Technologies Inc. (США) использовались в сочетании с логгерами WatchDog 1400 (2012), с использованием ПО SpecWare 9 Basic (2011) той же фирмы. Имеется встроенная «по умолчанию» градуировка в объемных %, но для большей точности рекомендуется проводить регистрацию в режиме «raw readings» с пересчетом по пользовательской градуировке для конкретной почвы. Заявленная точность в этом случае составляет 1%. Использование логгера позволяет выполнять автоматическую регистрацию влажности. В отличие от предыдущих приборов рекомендации по методике калибровки изложены достаточно детально, но в настоящей работе с целью единообразия подхода она была несколько модифицирована, для применения ко всем рассматриваемым приборам.



Лабораторные эксперименты по градуировке приборов

Для калибровки приборов использовались образцы минеральных горизонтов дерново-подзолистых почв песчаного и суглинистого гранулометрического состава, а также органических горизонтов (подстилки и торфа) из районов полевых исследований (Серпуховский р-н Московской обл. и Ульяновский р-н Калужской обл.). Объем составлял около 6 л, согласно инструкции к прибору MS-350A, имеющему датчик в виде щупа-зонда (Moisture..., 2015); для датчиков МГ-44 (с игольчатым датчиком) и SM100 допускалось использование образцов объемом 1.5 л, согласно Инструкции к последнему (WaterScout, 2011). Как показали дополнительные эксперименты, дальнейшее уменьшение объема образцов может привести к занижению отсчетов по приборам, и соответствующему завышению получаемых градуировочных кривых.

Образцы, высушенные до абсолютно сухого состояния, помещались в пластиковые ведра, уплотнялись до состояния близкого к естественному (плотность контролировалась по объему) и производились измерения влагомерами. Далее последовательно добавлялись порции воды, соответствующие повышению объемной влажности на 3–5%, проба перемешивалась, уплотнялась, выдерживалась 20 мин., после чего проводились измерения, а также контроль объема и массы образца. После насыщения его водой ведро оставлялось открытым, и измерения повторялись по мере высыхания (с интервалом от 1 суток в начале эксперимента до 2 недель в конце). Затем почва высушивалась до абсолютно сухого состояния, и рассчитывались поправки на потерю ее массы в ходе эксперимента. Поскольку в случае лесной подстилки перемешивание приводило к существенному изменению ее структуры и плотности, был проведен дополнительный эксперимент с подстилкой без перемешивания (с приборами МГ-44 и SM100 и объемом образца 1.5 л).

Результаты и обсуждение

Заметим, что в описаниях приборов МГ-44 и MS350A использован не вполне однозначно определяемый для почвы термин «относительная влажность». В почвоведении ее принято выражать в % от влагоемкости, или полной, или наименьшей (Шеин, Карпачевский, 2003). Но в технической литературе этим термином может обозначаться весовая влажность, отнесенная к массе влажного материала, в отличие от «абсолютной» – отнесенной к массе сухого вещества (Берлинер, 1973). В частности, в инструкции к МГ-44, по-видимому, имеется в виду второй вариант. Но, поскольку диэлектрическая проницаемость более тесно связана с объемной влажностью (Берлинер, 1973; WaterScout..., 2011), далее будем рассматривать именно эту величину.

На рис.1 приведены примеры градуировок исследуемых приборов, полученных для наших почвенных образцов. В случае влагомера МГ-44 градуировки построены в зависимости от напряжения на выходе датчика, для сравнения со встроенными заводскими. Но, поскольку значения напряжения доступны только в режиме калибровки, в дальнейшем измерения проводились по одной из встроенных шкал (как правило – «Абсолют»), а рабочие градуировки были пересчитаны по отношению к данной шкале. Заметим, что градуировки для объемной влажности различных почв существенно более близки между собой, чем заводские для «относительной» влажности. Особенно близки они для минеральных почв (песчаной и суглинистой), что может оказаться полезным при исследованиях пространственной неоднородности, когда не всегда есть возможность проконтролировать гранулометрический состав в каждой исследуемой точке. Градуировки для органических горизонтов все же отличаются, хотя и не так существенно, как у других рассматриваемых приборов.

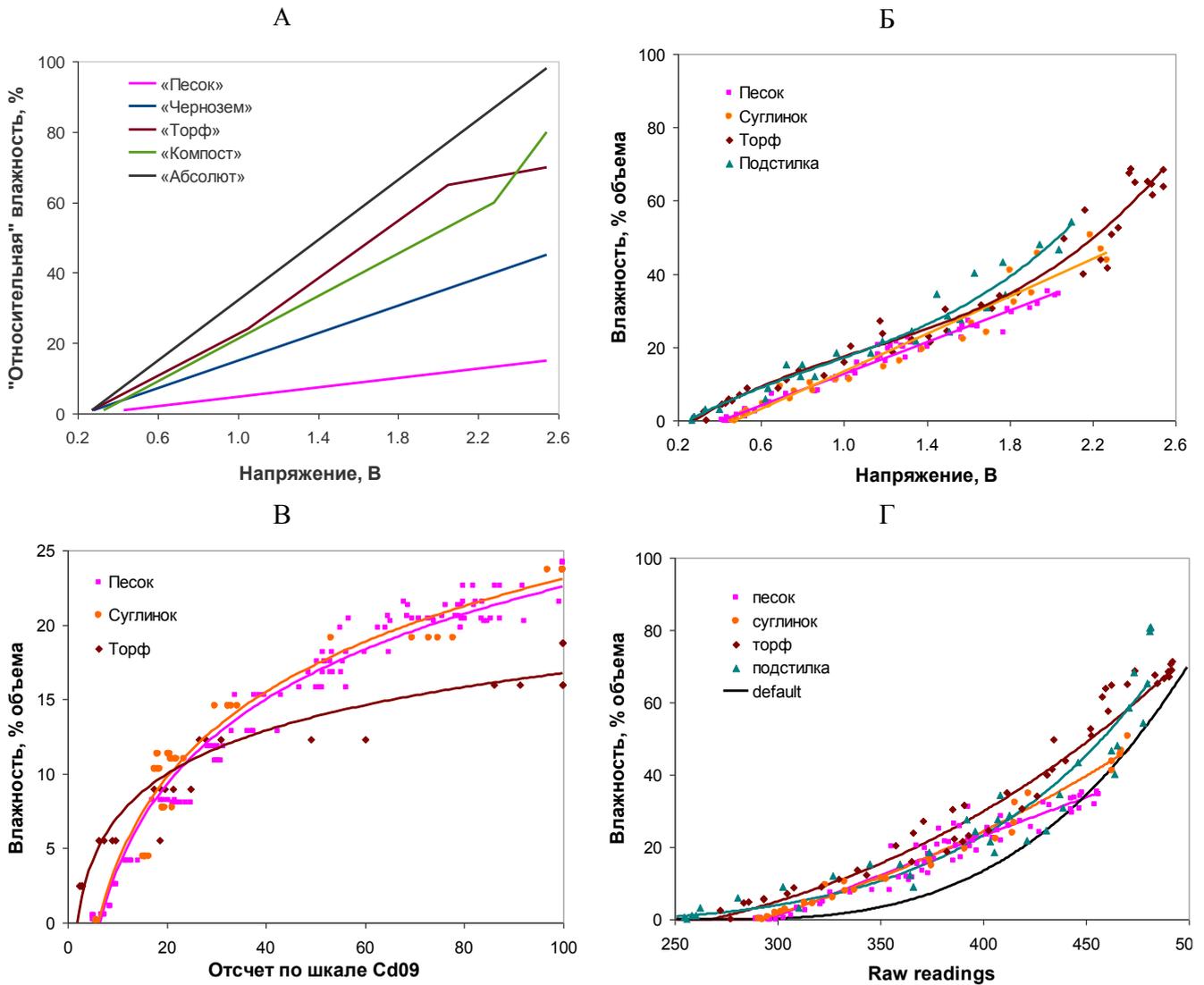


Рис.1. Примеры градуировочных кривых приборов: МГ-44 (А – встроенные, Б – полученные экспериментально), MS350 (В) и WaterScout SM100 (Г; здесь default – встроенная градуировка, остальные получены экспериментально)

В случае влагомера MS350A градуировки для минеральных и органических горизонтов различаются в еще большей степени. Кроме того, отдельные экземпляры данного прибора имеют различную чувствительность, поэтому требуют индивидуальной калибровки, и могут оказаться неприменимыми при высокой влажности почвы.

Градуировки датчиков WaterScout SM100 также зависят от свойств почвы, и могут существенно отличаться от встроенной по умолчанию кривой. Но, поскольку эти датчики предназначены для стационарной установки, различие градуировок для разных почв не должно создавать особых трудностей, т.к. каждый отдельный датчик используется для измерений в одной конкретной точке. Причем градуировочные кривые разных экземпляров датчиков для каждой конкретной почвы практически совпадают (различия обычно не превышают 1%, что соответствует их номинальной точности).



Хотя, как отмечено выше, теоретическая интерпретация градуировок, а следовательно – и обоснованный выбор вида кривых для их аппроксимации в нашем случае затруднены, чаще всего они удовлетворительно аппроксимируются степенными функциями вида:

$$\theta = a \cdot (x - b)^c,$$

где θ – влажность почвы (% объема), x – отсчет по прибору, a , b , c – коэффициенты. В отдельных случаях могут использоваться линейные, кусочно-линейные функции и полиномы 3-й степени. Для MS350A – также и логарифмическая функция.

В настоящее время описанные приборы используются для мониторинга влажности почвы на постоянной пробной площади в Приокско-Террасном заповеднике (Шанин и др., 2018) и для оценки локальных условий местообитания отдельных видов лесных трав и кустарничков (Зубкова и др., 2019).

Выводы

При использовании рассматриваемых приборов для мониторинга влажности почв, встроенные заводские градуировки, не являясь универсальными, обычно не обеспечивают заявленной точности. Как правило, требуется уточненная калибровка для конкретной почвы, или, по крайней мере, близкой по свойствам. Градуировки отдельных датчиков WaterScout SM100 для конкретной почвы практически не различаются между собой, хотя и различны для разных почв. Отдельные же экземпляры влагомера MS350A могут существенно различаться по чувствительности и фактическому диапазону измерений, поэтому требуют индивидуальной калибровки, и применимы в большей степени для сухих песчаных почв. Влагомер МГ-44 удобен тем, что его градуировки для объемной влажности различных почв различаются не столь значительно, а диапазон измерений (как и в случае приборов Spectrum) охватывает максимально возможный диапазон увлажнения почвы.

Благодарность

Работа осуществлена в рамках темы фундаментальных научных исследований (№ АААА-А18-118013190176-2), а также при поддержке РНФ (проект № 18-14-00362) в части работ с приборами Spectrum, и РФФИ (проект № 18-04-00527) – с прибором MS350A.

Литература

- Берлинер М.А. (1973) Измерения влажности. М.: Энергия. 400 с.
- Влагомер грунта МГ-44. Техническое описание и инструкция по эксплуатации (2009). Харьков: ООО «Весоизмеритель», 9 с.
- Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С. (2019) Методические рекомендации по сбору и подготовке данных для параметризации модели травяно-кустарничкового яруса CAMPUS-S. *Принципы и способы сохранения биоразнообразия: Материалы VII Международной научной конференции*. Йошкар-Ола, с. 63–65.
- Шанин В.Н., Шашков М.П., Иванова Н.В., Быховец С.С., Грабарник П.Я. (2018) Исследование структуры древостоев и микроклиматических условий под пологом леса на постоянной пробной площади в Приокско-Террасном заповеднике. *Труды Приокско-Террасного заповедника*. Вып. 7. М.: Товарищество научных изданий КМК, с. 72–85.
- Шеин Е.В., Карпачевский Л.О. (2003) Толковый словарь по физике почв. М.: ГЕОС. 124 с.
- Moisture meter MS350A [Manual] (2015), 2 p.
- SpecWare 9 Pro and Basic Software. Product Manual (2011). Spectrum Technologies Inc., 52 p.
- WatchDog 1000 series Micro Stations. Product Manual (2012). Spectrum Technologies Inc., 12 p.
- WaterScout SM100 Soil Moisture Sensor. Product Manual (2011). Spectrum Technologies Inc., 20 p.



УДК51-7+519.651:631.417.1

ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ФИЗИКИ ПОЧВ

Глаголев М.В.^{1,2,3}, Сабреков А.Ф.³

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

²Институт лесоведения РАН, с. Успенское Московской обл., Российская Федерация
m_glagolev@mail.ru

³Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация
sabrekovaf@gmail.com

ILL-CONDITIONED MATHEMATICAL PROBLEMS OF SOIL PHYSICS

Glagolev M.V.^{1,2,3}, Sabrekov A.F.³

¹Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe (Moscow region), Russia

³Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Annotation: The problem of parameters identification for a well-known mathematical model of the soil organic matter concentration profile was considered. Exact solution is the sum of two exponents. For a certain input data it was shown that this problem belongs to the class of ill-conditioned, since a small bias in the input data causes a significantly larger error in the solution.

Введение

Если до недавнего времени под математической обработкой эксперимента обычно понималась совокупность сравнительно простых операций, связанных с масштабированием данных, внесением поправок на фон или на дрейф показаний приборов, фильтрацией наиболее грубых ошибок и т.п., то теперь в это понятие вкладывается более широкий смысл (Воскобойников и др., 1984, с. 4). Фактически, сюда относятся многие обратные задачи, в которых по следствиям (результатам эксперимента) требуется восстановить причину (свойства объекта или процесса). В частности, таковыми являются задачи идентификации параметров математических моделей по результатам косвенных измерений (т.е. таких, в которых измеряются не сами эти параметры, а некоторые другие, связанные с ними функциональными зависимостями).

К сожалению, с точки зрения классической математической теории многие обратные задачи (далее: IP – от англ. inverse problem) являются некорректно поставленными, поскольку их решения либо не единственны, либо неустойчивы (Жданов, 2007, с. 20). В частности, IP вычисления параметров некоторой зависимости по экспериментальным данным становится в ряде случаев некорректной, т.к. нарушается условие устойчивости (Мицель и др., 2004). Здесь мы ограничимся именно этой обратной задачей. Но прежде обсудим понятие обусловленности задачи.

Пусть задача корректна (ее решение существует, единственно и устойчиво по входным данным). Теоретически, наличие у задачи устойчивости означает, что ее решение может быть найдено со сколь угодно малой погрешностью если погрешности исходных данных достаточно малы. Однако на практике погрешности входных данных не могут быть сделаны сколь угодно малыми – точность их ограничена. Под *обусловленностью вычислительной задачи* понимают чувствительность ее решения к малым погрешностям входных данных. Задачу называют *плохо обусловленной* (далее: ICoP – от англ. ill-conditioned problem), если малым погрешностям входных данных (δf) отвечают сильные изменения решения (δv). Величина α в неравенстве $\delta v \leq \alpha \cdot \delta f$ называется *относительным числом обусловленности*



(если δv и δf – именно *относительные* погрешности). Для ICoP $\alpha \gg 1$. Но точный ответ на вопрос о значении α , при котором следует признать, что задача стала ICoP, существенно зависит от предъявляемых требований к точности решения и от уровня обеспечиваемой точности исходных данных (Амосов и др., 2008, с. 54-55). Кроме того, для нелинейных моделей следует ожидать $\alpha \neq const$, поэтому задача может быть хорошо обусловленной при одних значениях δf , но становиться ICoP при других (обычно – больших) δf . Заметим, что задача, являющаяся *некорректной* по причине неустойчивости, представляет собой предельный случай ICoP, а именно: задачу с $\alpha = \infty$. Но для практики нет разницы между такой некорректной задачей и ICoP, формально корректной, однако имеющей настолько большое $\alpha \neq \infty$, что (при заданной δf) δv оказывается совершенно неудовлетворительной. Минимально возможные значения δf ограничиваются как точностью измерений, доступной при данном уровне развития техники, так и минимальной погрешностью модели, доступной на данном уровне развития науки.

Плохо обусловленная обратная задача идентификации параметров

В почвоведении (впрочем, как и в ряде других естественных наук) часто встречается задача представления некоторой полученной из эксперимента зависимости в виде суммы экспонент, коэффициенты которых имеют важный для исследователя физический смысл.

Так, многие модели, основанные на представлении о разложении органического вещества, содержат только два члена – один для легко разлагающихся компонентов и один для более устойчивых:

$$f(x) = C_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot x) + C_2 \cdot \exp(-k_2 \cdot x), \quad (1)$$

где f – остаточный субстрат в момент времени x (в % от начального количества субстрата), а C_1 и C_2 – начальные количества субстратов (в %; поэтому $C_1 + C_2 = 100$), которые разлагаются, соответственно, с константами скорости k_1 и k_2 (Тейт, 1991, с. 314).

Аналогичный вид имеет решение краевой задачи

$$D \cdot d^2f/dx^2 = k \cdot f - R \cdot \exp(-b \cdot x), \quad -D \cdot df/dx|_{x=0} = L; \quad f(\infty) = 0,$$

(где f – концентрация органического вещества в почве; x – глубина), описывающей стационарный органофильный профиль почвы при следующих предположениях: (i) механизм распределения органического вещества (далее: SOM – от англ. soil organic matter) в почве – только диффузионный (с коэффициентом диффузии D); (ii) разложение SOM удовлетворяет кинетике 1-го порядка (с константой скорости k); (iii) источником SOM является, во-первых, постоянный удельный поток наземного опада (L); и, во-вторых, (iv) корневые системы распределены с глубиной по экспоненциальному закону (с параметрами R и b). Форма профиля SOM отражает интенсивность вышеперечисленных процессов, в связи с чем кажется, что существует принципиальная возможность количественной оценки их интенсивности по данным о профильном распределении (Смагин и др., 2001, с. 85, 87). Подчеркнем, что решение поставленной выше краевой задачи имеет вид (1), но теперь коэффициенты в (1) зависят от имеющих ясный физический смысл параметров D, k, L, R, b :

$$C_1 = L/(k_1 \cdot D) - b \cdot C_2/k_1, \quad k_1 = (k/D)^{1/2}, \quad C_2 = R/(k - D \cdot b^2), \quad k_2 = b. \quad (2)$$



Для определенности будем рассматривать задачу идентификации параметров именно этой модели органопрофиля, т.е. по известным значениям концентрации SOM на различных глубинах – $f_i(x_i)$ – нам нужно найти параметры C_1 , k_1 , C_2 и k_2 зависимости (1), а затем вычислить величины D , k , R и b : $b = k_2$, $R = (k - D \cdot k_2^2) \cdot C_2$, $D = L / (k_1 \cdot C_1 + k_2 \cdot C_2)$, $k = D \cdot k_1^2$.

Однако мы сталкиваемся с наиболее трудной проблемой: как узнать, что получены верные ответы (Райс, 1984, с. 7). По-видимому, надежным решением ее может быть только такое: (i) сначала задаться какими-то значениями D , k , L , R и b ; (ii) потом рассчитать по ним несколько значений $f_i(x_i)$ – столько, сколько имеется реальных измерений для профиля (расчет сделать для тех же глубин, для которых есть реальные измерения); (iii) затем слегка «испортить» рассчитанные значения, наложив на них случайный шум Δf_i , моделирующий погрешность экспериментальных данных; (iv) и, наконец, по зашумленным значениям $f_i(x_i) + \Delta f_i$ путем решения ИР рассчитать параметры, которые теперь мы обозначим D^* , k^* , R^* и b^* (поскольку их значения будут несколько отличаться от исходных). Т.к. исходные значения D , k , R и b нам абсолютно точно известны, то описанная процедура позволит оценить: насколько сильно погрешность вкуче с конкретным алгоритмом решения ИР искажает истинные значения параметров. Если выполнить описанный алгоритм многократно, то, благодаря шагу (iii), можно оценить влияние погрешности «экспериментальных» данных на погрешность результата, т.е. оценить обусловленность задачи или, другими словами, ее чувствительность к погрешности данных.

Как видим, идея, лежащая в основе анализа чувствительности, весьма проста и имеет общий характер: решить задачу с несколькими разными данными и посмотреть, насколько чувствительно решение к изменению в данных (Райс, 1984, с. 106). Итак, приступим к конкретным вычислениям. В качестве исходных возьмем значения, данные в (Смагин и др., 2001, с. 88) для чернозема типичного: $D = 0.000251$ м²/год, $R = 0.227523$ кг/(год·м³), $k = 0.00278$ 1/год, $L = 0.008$ кг/(год·м²) и $b = 2.558$ 1/м. По формуле (1) с коэффициентами (2) были рассчитаны значения f_i для 18 глубин x_i , представленные в Табл. 1.

Таблица 1. Типичные данные для идентификации параметров уравнения (1).

| Глубин а (x_i , м) | $C_{\text{орг}}$ (кг/м ³) | | Глубина (x_i , м) | $C_{\text{орг}}$ (кг/м ³) | |
|--------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|---------------------------------------|--|
| | точные данные (f_i) | данные с погрешностью ($f_i + \Delta f_i$) | | точные данные (f_i) | данные с погрешностью ($f_i + \Delta f_i$) |
| 0.04 | 54.51 | 55.35 | 0.84 | 14.5 | 12.9 |
| 0.07 | 52.87 | 54.81 | 1.02 | 9.79 | 9.29 |
| 0.11 | 51.00 | 52.54 | 1.21 | 6.52 | 6.34 |
| 0.18 | 46.84 | 47.96 | 1.43 | 3.95 | 3.60 |
| 0.22 | 44.64 | 41.58 | 1.61 | 2.58 | 2.35 |
| 0.33 | 38.00 | 39.70 | 1.79 | 1.67 | 1.68 |
| 0.40 | 33.67 | 31.68 | 2.00 | 1.00 | 1.00 |
| 0.51 | 27.70 | 25.10 | 2.50 | 0.30 | 0.30 |
| 0.62 | 22.60 | 23.20 | 3.00 | 0.09 | 0.10 |

В качестве «псевдоэкспериментальных данных» (ПЭД) использовались эти значения, но с наложенным на них гауссовым шумом Δf_i ; один из вариантов ПЭД для коэффициента вариации (CV) 5% представлен в Табл. Для каждого уровня CV генерировалось 90 наборов ПЭД и по каждому из них при помощи MATLAB-функции `lsqcurvefit` идентифицировались



коэффициенты (2), в результате чего были получены 90 значений D , 90 значений k и т.д. По полученным значениям рассчитывался CV для каждого параметра (см. «Приложение»).

Результаты представлены на рис. 1. Очевидно, что задача идентификации параметра b является хорошо обусловленной, поскольку CV для этого параметра примерно соответствует CV исходных данных f . Но для всех остальных параметров мы имеем типичные ICoP. Например, если CV исходных данных составляет 10%, то CV для D будет составлять $27.763 \cdot 10^{1.36} \approx 636\%$, а для k и R – около 1000% (k и R имеют очень близкие зависимости CV от погрешности данных, поэтому на рис. 1 соответствующие прямые практически сливаются). Иначе говоря, если данные (f) экспериментальных измерений получены с погрешностью около 10%, то коэффициенты k и R , полученные путем решения IP для модели (1)-(2), могут отличаться от истинных в 10 раз!

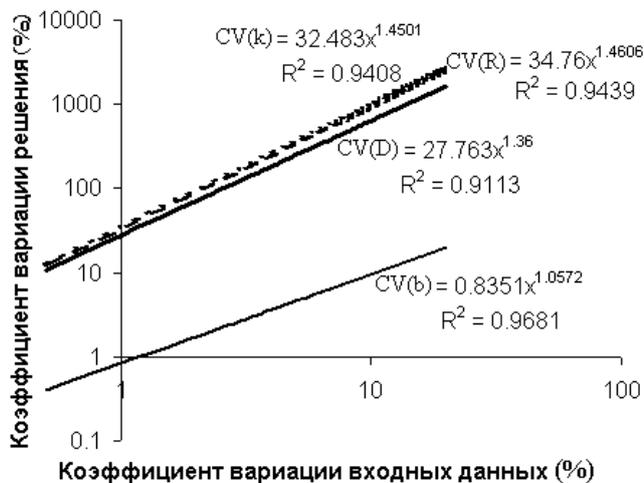


Рис. 1. Обусловленность задачи идентификации коэффициентов модели (1).

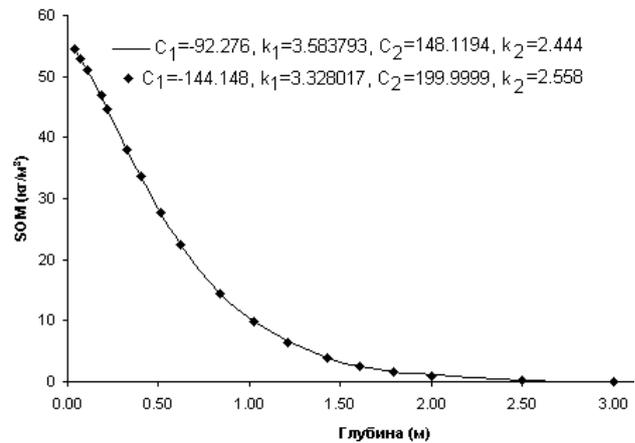


Рис. 2. Неоднозначность аппроксимации данных моделью (1).

Причина плохой обусловленности идентификации параметров модели (1) кратко проиллюстрирована на рис. 2. Как видим, формула (1) при совершенно разных значениях параметров (ср. $C_1 = -92.276$ и $C_1 = -144.148!$) дает практически одинаковые кривые. Более подробно математические основы неустойчивости IP идентификации параметров рассмотрены в блестящей работе (Корнилов, 1991). Применение описанного здесь метода (анализа обусловленности через исследование чувствительности) к другим задачам биологии и почвоведения см., например, в (Еремеев и др., 1989; Panikov et al., 1992; Глаголев, 2012; Моченов и др., 2017). Поскольку с точки зрения вычислительной практики разницы между некорректностью и плохой обусловленностью, фактически, нет, то и способы борьбы с последней точно такие же, как и с некорректностью, в частности, методы регуляризации – см., например, (Воскобойников и др., 1984; Корнилов, 1991; Мицель и др., 2004; Жданов, 2007) и цитированную там литературу.

Приложение: Листинг программы анализа обусловленности

function lsqcurvefit_test

X=[0.04 .07 .11 0.18 0.22 .33 0.4 0.51 0.62 0.84 1.02 1.21 1.43 1.61 1.79 2 2.5 3];

Y=[54.51 52.87 51 46.84 44.64 38 33.67 27.7 22.6 14.5 9.79 6.52 3.95 2.58 1.67 1 0.3 0.09];

L=0.008; % [кг/год/кв.м] Интенсивность опада

CV=0.05; % Коэффициент вариации (std/mean)



```

N=50; % Количество повторений при статистическом моделировании
xdata=X; xlnY = xdata(end-4:end); options = optimset('MaxFunEvals',8000,'MaxIter',2000);
for i=1:N
    for j=1:length(X)
        ydata(j)=Y(j)*(1+CV*randn);
        if ydata(j)<0 ydata(j)=eps; end %if
    end %for j...
lnY=log(ydata(end-4:end)); [P,S] = polyfit(xlnY,lnY,1); % Starting guess
x0 = [-exp(P(2)), -P(1), exp(P(2)), -P(1)];
% Решение задачи минимизации квадратов отклонений
[x,resnorm] = lsqcurvefit(@myfun,x0,xdata,ydata,[],[],options);
B(i)=x(4); d(i)=L/(x(1)*x(2)+x(3)*x(4)); K(i)=d(i)*x(2)^2; r(i)=x(3)*(K(i)-d(i)*x(4)^2);
end %for i...
b=mean(B), CV_b=std(B)/b, D=mean(d), CV_D=std(d)/D,
k=mean(K), CV_k=std(K)/k, R=mean(r), CV_R=std(r)/R,
function F = myfun(x,xdata)
F = x(1)*exp(-x(2)*xdata)+x(3)*exp(-x(4)*xdata);
    
```

Литература

- Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. (2008) Вычислительные методы. М.: Издат. дом МЭИ. 672 с.
- Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. (1984) Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука. СО.
- Глаголев М.В. (2012) Анализ чувствительности модели. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата* 3(3), 31-53.
- Еремеев Н.Л., Карякин А.А., Казанская Н.Ф. (1989) Кинетика растворения твердых белковых субстратов протеиназами. Выбор механизма реакции. *Биохимия* 54, 503-510.
- Жданов М.С. (2007) Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир. 712 с.
- Корнилов А.Н. (1991) Неформальные причины численной неустойчивости некоторых задач аппроксимации экспериментальных данных. *Неформальные математические модели в химической термодинамике*. Новосибирск: Наука. С. 65-81.
- Мицель А.А., Пшеничников А.М., Щербаков А.П. (2004) Применение локальной регуляризации в подгонке контуров линий в молекулярных спектрах. *Вычислительные технологии* 9(2), 63-69.
- Моченов С.Ю., Чуркина А.И., Глаголев М.В. (2017) Анализ корректности почвенно-градиентного метода измерения эмиссии газов. *Математическое моделирование в экологии (Материалы Пятой Национальной научной конференции с международным участием, 16-20 октября 2017 г.)*. Пушкино: ИФХиБПП РАН. С. 131-133.
- Райс Дж. (1984) Матричные вычисления и математическое обеспечение. М.: Мир. 264 с.
- Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. (2001) Моделирование динамики органического вещества почв. Москва.
- Тейт Р. (1991) Органическое вещество почвы: Биологические и экологические аспекты. М.: Мир. 400 с.
- Panikov N.S., Blagodatsky S.A., Blagodatskaya J.V., Glagolev M.V. (1992) Determination of microbial mineralization activity in soil by modified Wright and Hobbie method. *Biology and Fertility of Soils* 14, 280-287.



УДК: 630.631

ПОЛИМЕРНЫЕ ГЕЛИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВ

Данилова Т.Н.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
danilovatn@yandex.ru

POLYMERIC GELS FOR INCREASING WATER REDUCING SOIL CAPACITY

Danilova T. N.
Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy pr., St.- Petersburg, 195220

Annotation: The article considers the possibility of using the Aquasin hydrogel as a water-retaining additive to improve the water-physical properties of sod-podzolic sandy loam soil. The range of available moisture increased in proportion to the increase in the lowest moisture capacity from 10% in the control to 22 % at the maximum hydrogel concentration.

Keywords: hydrogel, soil moisture potential, sod-podzolic sandy soil, psychrometer, water-holding capacity.

Введение

Водно-физические свойства почв легкого гранулометрического состава не являются оптимальными для нормального роста и развития растений. Для повышения водоудерживающей способности таких почв особо перспективными представляются гидрогели. Они обладают одновременно свойствами твердого тела и жидкости, поглощенной ими, и способны удерживать до нескольких литров влаги на грамм сухого вещества. Внесение гидрогеля обеспечивает создание дополнительного запаса влаги на разных стадиях выращивания сельскохозяйственных культур. Дополнительный запас влаги, получаемый при внесении гидрогеля может составлять от 10 до 30 мм и значительно пролонгировать влажность на весь вегетационный период. Расчетный прирост влажности почв при добавках полимера при набухании 300 мл на 1г. составляет 3 мм. влаги, т.е 30 т. влаги на гектар при дозе внесения полимера порядка 100 кг/га. Максимальная эффективность полимера как мелиоранта обеспечивается уже при дозах 0,0002 %.

В исследованиях, проведенных на трех различных почвенных текстурах, было обнаружено, что доступное содержание воды увеличилось в 1,8 раз на глине, в 2,2 раза на суглинке, и в 3,2 раза больше на песчано-суглинистой почве, по сравнению с контролем (Abedi-Kouprai et al., 2008). Эксперименты проводимые на определение влагоудерживаемой способности гидрогеля показали, что применение гидрогеля позволяет поддерживать достаточную влажность в корневой зоне песчаных почв и уменьшает потери воды, вызванные его потоком в почвенном профиле (Al-Omran et al., 1987).

Термодинамику влаги в песках с добавлением сильнонабухающих полимерных гидрогелей рассматривали многие исследователи (Воронин, Витязев, 1979). Они изучали основную гидрофизическую характеристику водно-физических свойств почв методом капилляриметрии. В опытах, проведенных на фракциях песка с разными добавками сильнонабухающих полимерных гидрогелей — от 0,01 до 0,2 %, было установлено увеличение полезного запаса влаги за счет кажущегося перераспределения пор по размерам.



Сильная чувствительность набухания полимерных гелей даже к низким давлениям вышележащих слоев ограничивает их влагоемкость в почве. Поэтому необходимо согласовывать размеры частиц геля и почвенных пор, в которых они расположены.

В состоянии насыщения почвы влагой, капиллярно - сорбционный (матричный) потенциал, или энергия водоудерживания со стороны почвы как капиллярно-пористого тела равна нулю. Такая влага свободно передвигается в поле силы тяжести с максимальной скоростью, оцениваемой физическим показателем - коэффициентом фильтрации (Кф). Однако, находящаяся в избытке почвенная вода, может угнетать рост и развитие растений. Подобная ситуация нередка для почв гидроморфных ландшафтов и условий сезонного переувлажнения, для которых влажность почвы близка к ПВ. В результате возникает дефицит кислорода, угнетающее воздействие углекислоты и других токсичных газов на корневые системы культур, сопровождающиеся угнетением их роста и отмиранием (так называемым «вымоканием»). Анализ ОГХ позволяет выявить критическое значение потенциала почвенной влаги и ее содержания, достижение которых по мере иссушения почвы от ПВ, приводит к нормальному функционированию корневых систем и отсутствию симптомов угнетения роста (Шеин, 2005).

Целью данного исследования является изучение возможностей полимерного геля «Аквасин» как водоудерживающей почвенной добавки для улучшения водно-физических свойств дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Поставленная цель включает решение следующих задач: определение водоудерживающей способности самого гидрогеля и исследование влияния гидрогеля на водоудерживающую способность дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Объекты и методы

Гидрогель «Аквасин» - сшитый полимер акриловой кислоты на основе соли калия, 1 г геля удерживает около 400 мл. воды, содержание сухого продукта не менее 85-90 %. Удельный вес $0,6 \text{ г/см}^3$, $\text{pH} = 6$. Доступность воды для растений – 95 %, устойчивость продукта в почве – до 5 лет. Адсорбция: 400 г/г в деионизированной воде; 150 м г/г в почвенном растворе, в растворе: 0,125 % NPK 14-12-14 $2\text{MgO} > 300 \text{ мг/л}$. Производство – разработан ООО ПКФ "Сингер" (г.Зеленодольск) совместно с ПАО "Татнефтехиминвест-холдинг" (Казань), Россия.

Для эксперимента были взяты образцы дерново-подзолистой супесчаной почвы. Плотность $1,26 \text{ г/см}^3$. Почвенные образцы нарушенного сложения были просеяны через сито с отверстиями диаметром 1мм (берутся фракции - 0,25мм, 0,5мм, 1,0мм). Навеска почвы – 5г. В образцы почвы гидрогель добавляли в дозе: из расчета 100 кг/га – 0,42 г; 300 кг/га – 1,26 г. Образцы помещались в пластиковые кюветы (диаметр - 40 мм; высота – 10 мм). Увлажняли из расчета НВ = 24-25% - контроль, 100 кг/га – 1,25 мл. воды; 300 кг/га – 1,5 мл. воды. Для равномерного увлажнения образцы почв оставляли на сутки в закрытых кюветах. Определение водоудерживающей способности почв с гидрогелем проведено на приборе WP4-T Dewpoint Potentia Meter. Работа прибора основывается на измерении потенциала воды с использованием метода точки росы охлаждаемого зеркала. Психрометр WP4 измеряет сумму осмотического и капиллярно-сорбционного потенциалов в образце. Осмотический потенциал зависит от концентрации растворенного вещества в воде. Капиллярно-сорбционный (матричный) потенциал зависит от адсорбционных сил связывания воды в матрице. Часто один или другой из этих потенциалов будет доминирующим фактором при определении общего потенциала. Почвы связывают воду в основном за счет капиллярных сил, и, следовательно, имеют в основном капиллярно - сорбционный потенциал. А набухший гидрогель будет иметь только осмотический потенциал. Прибор измеряет водный потенциал



от 0 до - 60 МПа с точностью $\pm 0,1$ МПа; от 0 до -10МПа $\pm 1\%$ в диапазоне от -10 до - 60 Мпа. Измерения основных гидрофизических характеристик почв проводились в трехкратной повторности.

Для статистической обработки данных использовали пакет программ Statistics 5.0. Статистическая обработка результатов включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов линейной корреляции при уровне надежности – $p \leq 0.05$. Достоверность различий средних значений оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при $p \leq 0.05$.

Результаты и обсуждение

Водоудерживание можно определить как способность почвы удерживать влагу в основном капиллярно-сорбционными силами; это влажность почвы при определенном давлении. Чем выше влажность почвы при одном и том же давлении, тем выше водоудерживающая способность или водоудержание почвы.

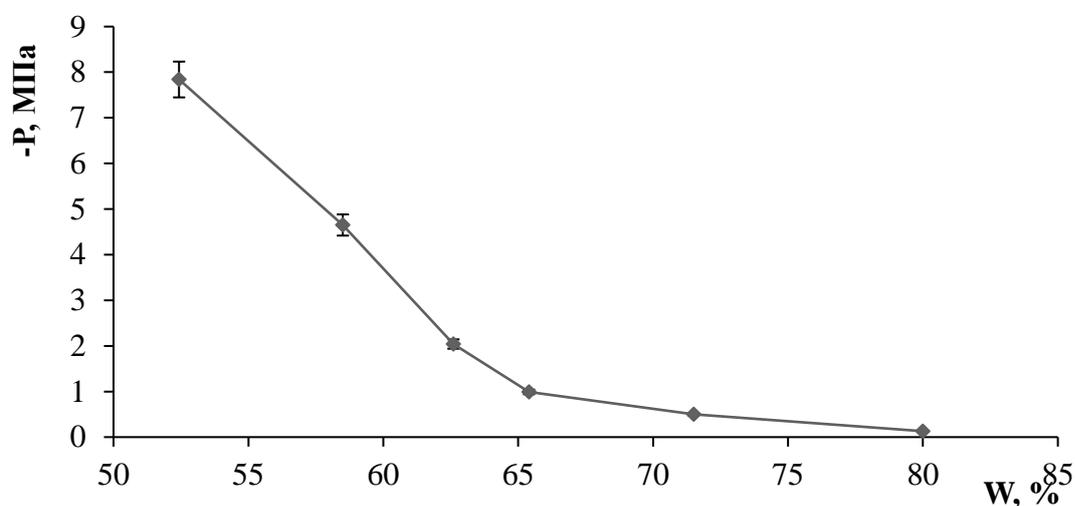


Рис. 1. Зависимость осмотического давления влаги от влажности гидрогеля Аквасин.

Кривые влагоудерживания, представленная на рис.1, показывает, что с уменьшением осмотического давления повышается влагоудерживающая способность гидрогелей, т.е. увеличивается диапазон доступной влага, содержащейся в гидрогеле Аквасин ($80,0 - 52,4 = 27,6\%$).

Кривые водоудерживания (рис.2), полученные при добавлении в почвенные образцы геля показывают, что водоудерживающая способность почв меняется: почвы удерживают больше влаги, доступной для растений. Это объясняется тем, что увеличение влажности почвы за счет сорбции влаги молекулами гидрогеля приводит к изменению водоудерживающей способности почвы (Данилова, 2013). Внесение гидрогеля в значительной мере повлияло на водоудерживающую способность дерново-подзолистой супесчаной почвы пропорционально дозе абсорбента, что отразилось закономерным смещением ОГХ относительно контроля в область повышенных значений равновесных влажностей и потенциалов почвенной влаги.

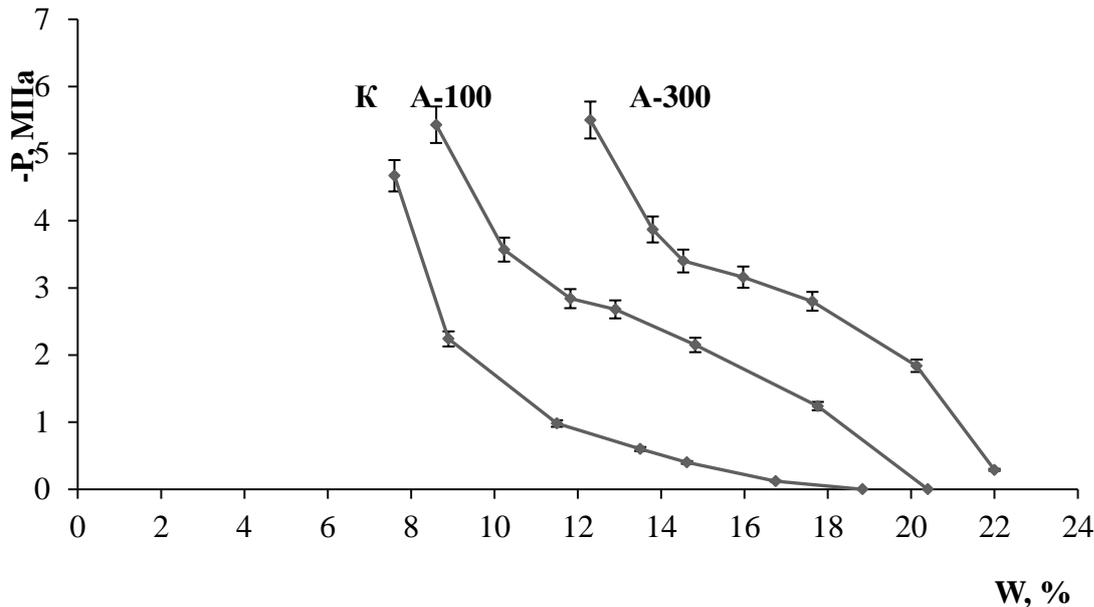


Рис. 2. Зависимость капиллярно-сорбционного давления влаги от влажности почвы (дерново-подзолистая супесчаная почва): К- контроль; А₁₀₀– образцы почвы с гелем Аквасин - 100 кг /га; А₃₀₀ –образцы почвы с гелем Аквасин - 300 кг/ га.

Считается, что НВ – влажность, соответствующая - 0,33 атм, влажность устойчивого завядания растений (ВУЗ) – соответствует -15 атм. На нашем графике это соответствует 1,5 МПа, т.е. на контрольном варианте растения уже испытывают угнетение, доступная влага всего 10 %. При внесении гидрогеля диапазон доступной влаги изменяется. Влагосодержание увеличивается от 10 до 17 % при внесении гидрогеля в дозе 100 кг/га, а в варианте с гидрогелем, внесенным в дозе 300 кг/га - диапазон доступной влаги увеличивается до 22 %.

Выводы

Проведенные исследования показали, что вода, поглощаемая гидрогелем, находится в диапазоне доступной для растений влаги (10 – 22 %). Наилучший эффект влияния гидрогеля на водоудерживающую способность почв был отмечен на образцах супесчаной дерново-подзолистой почвы при внесении гидрогеля Аквасин в дозе 300 кг/га. Диапазон доступной (продуктивной) влаги (НВ - ВЗ) возрос пропорционально увеличению НВ от 10 % на контроле до 22 % при максимальной концентрации гидрогеля.

Литература

- Воронин А.Д., Витязев В.Г. (1979). Влияние полимеров гидрофильной и гидрофобной природы на свойства поверхности почвенных частиц. *Агрохимия*, №1, с. 85-89.
- Данилова Т.Н. (2013). Влияние полимерного геля «Ритин -10» на водно-физические свойства почв. / *Агрофизика*, № 2, АФИ. С. 38 - 43.
- Шейн В.В. (2005). *Курс физики почв. (Учебник) М.: МГУ. 432с.*
- Abedi-Koupai J, Sohrab F, Swarbrick G. (2008). Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. *Journal of Plant Nutrition*. Vol. 31, pp. 317-331.
- Al-Omran, A.M., Mustafa M.A., Shalaby A.A. (1987). Intermittent evaporation from soil columns as affected by a gel farming conditioners. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* Vol. 51, pp. 1593-1599.



УДК 631.4

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СВЕТЛО-СЕРЫХ ОГЛЕЕННЫХ ПОЧВ ТАМБОВСКОЙ РАВНИНЫ

Даутоков И.М.¹, Никифорова А.С.², Степанцова Л.В.¹, Красин В.Н.¹

¹ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, РФ

krasinslaw84@gmail.com

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

akefir@rambler.ru

PHYSICAL PRECONDITIONS OF QUANTITATIVE DIAGNOSTICS OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE LIGHT GRAY GLEYED SOILS OF THE TAMBOV PLAIN

Dautokov I.M., Nikiforova A.S., Stepantsova L.V., Krasin V.N.

FSBEI HE Michurinsk SAU, Michurinsk, RF

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, RF

Annotation: The accumulation of sludge in the profile of light-gray gleyed soils of the Tambov plain causes superficial stagnation of moisture, and determines the content of various huminic acid fractions. This allows you to use the ratio of the optical density of alkaline and alkaline pyrophosphate extracts as a quantitative estimate of the degree of waterlogging.

Введение

Серые лесные почвы широко представлены на территории Тамбовской области. Их спектр не ограничивается тяжелосуглинистыми разностями (Ахтырцев, 1993; Ахтырцев, 1979; Зейдельман, 2012). Наименее изученные светло-серые почвы приурочены к песчаным и супесчаным отложениям (Даутоков, 2017). Несмотря на легкий гранулометрический состав они подвержены поверхностному заболачиванию. Пятилетние режимные наблюдения показали, что в сухие годы эти почвы полностью переходят в автоморфный режим и оценить степень их гидроморфизма можно только по морфологическим критериям (Зейдельман, 2018). Ранее на примере черноземов было показано, что поверхностное заболачивание влияет на состав органического вещества почв лесостепи, на основе чего был предложен количественный критерий оценки степени гидроморфизма черноземов (Зейдельман, 2012; Зейдельман, 2013).

Цель настоящей работы: изучить состав органического вещества светло-серых и светло-серых поверхностно-оглеенных почв и оценить его диагностическое значение.

Объект и методы

Объектом изучения послужил ряд светло-серых почв различной степени оглеения на I надпойменной террасе р. Лесной Воронеж. Гранулометрический состав определяли по Долгову и Личмоновой. МГ и НВ - по Николаеву, фракционный состав гумуса - по Пономаревой и Плотниковой, критерий степени гидроморфизма этих почв - по оптической плотности щелочной и щелочной пирофосфатной вытяжек (Зейдельман, 2012; Зейдельман, 2013). Исследования проводились на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ.



Таблица 1. Водный режим и агрофизические свойства

| Разрез, почва | Водный режим в ... год | | | Распределение ила по профилю | Физико- химические свойства |
|--|--|--|---|--|--|
| | Сухой | Средний | Влажный | | |
| 1. Светло-серая | Просыхание метровой толщи до ВЗ | Накопление влаги на псевдофибрах | Оптимальная влажность ВРК-ППВ | Накопление ила и пыли на псевдо-фибрах | Повышенная кислотность, V=55-68 %, ДАВ-4-6% |
| 2. Светло-серая глубокооглеенная | | Просыхание верхних 50 см до ВЗ | | Накопление ила на контакте 70- 90см | |
| 3. Светло-серая поверхностно- слабо-глееватая | Просыхание верх-них 50 см до ВЗ, метровой тол-щи до ВРК | Верховодка в средней части профиля | Полное за- топление профиля или двухъярусная верховодка | Накопление ила с глубины 40 см | Повышенная кислотность, V=60-80%, ДАВ- 8-12%, снижение пористости аэрации нижних гори-зонтов |
| 4. Светло-серая поверхностно- сильно-глееватая | | Верховодка в нижних горизонтах | | Накопление ила во всей верхней толщ | |
| 5. Светло-серая поверхностно- глеевая | | Двухъярусная верховодка | | | |

Результаты и обсуждения

Исследуемые почвы сформировались на двучленных отложениях. Верхняя толща представляет собой супесь мелкозернистую с высоким содержанием пылеватой фракции (16-30 %), нижняя – песок (до 60%) разномзернистый с содержанием ила 5-10%. Высокое содержание пыли определяет низкую водопроницаемость верхних горизонтов и поверхностный застой влаги в понижениях рельефа. Для верхней пылевато-песчаной толщ характерно элювиально-иллювиальное распределение ила (табл. 1). Легкий гранулометрический состав почв способствует не только вертикальному, но и латеральному перемещению ила. В незаболоченных почвах ил накапливается только в нижних частях профиля. Для гумусовых горизонтов, обедненных этой фракцией характерен узкий диапазон активной влаги, что определяет низкую устойчивость почв к засухам. В сухие по летним осадкам годы профиль светло-серых неоглеенных почв иссушается до ВЗ на глубину 1 м, а гумусовый горизонт до ВРК просыхает после 10-ти дневного отсутствия осадков. Без орошения урожайность с.-х. культур нестабильна. Во влажные и средние по летним осадкам годы урожайность зерновых составляет 25-45 ц/га, трав - 80-150 ц/га (табл. 2). В сухие годы наблюдается гибель растений.

В поверхностно оглеенных почвах накопление ила наблюдается не только в нижних, но и верхних горизонтах. Расширяется диапазон активной влаги. В средние и влажные по зимним осадкам годы образуется двухуровневая верховодка – поверхностный застой влаги сочетается с внутрипочвенным. В очень влажные годы - весь профиль поверхностно-оглеенных почв обводнен. На светло-серых поверхностно-слабо и сильно-глееватой почвах в средние годы урожайность трав повышается до 150-180 ц/га, во влажные – их продуктивность снижается на 30-40% по сравнению с неоглеенной почвой. На светло-серой поверхностно-



глеевой почве часты вымочки полевых культур, продуктивность трав не превышает 80-120ц/га.

Таблица 2 Продуктивность в годы разной влажности

| Разрез, почва | Урожайность, ц/га | | | | |
|---|-------------------|------------------|---------------|-------------------|-----------------|
| | ячмень | Однолетние травы | | Многолетние травы | |
| | 2012 средний | 2013 средний | 2014 сухой | 2015 сухой | 2016 влажный |
| 1. Светло-серая | 42.7 ± 4.4 | 70.4 ± 8.1 | 11.2 ± 2.1 | 153 ± 14 | 141 ± 19 |
| 2. Светло-серая глубокооглеенная | 29.4 ± 1.1 | 95.0 ± 6.0 | 5.2 ± 1.4 | 145 ± 22 | 133 ± 22 |
| 3. Светло-серая поверхностно- слабооглеенная | 41.0 ± 3.2 | 188 ± 11 | 9.2 ± 3.1 | 118 ± 22 | 88 ± 8 |
| 4. Светло-серая поверхностно- сильнооглеенная | 16.6 ± 2.5 | 181 ± 4 | 14.2 ± 2.1 | 117 ± 22 | 137 ± 16 |
| 5. Светло-серая поверхностно- глеевая | вымочка | 59.6 ± 4.1 | 8.2 ± 3.1 | 127 ± 18 | 99 ± 20 |

Таблица 3 Фракционный состав гумуса

| Горизонт | Соб, % | ФК (С, % от Соб) | | | | ГК (С, % от Соб) | | | С ост, % | Сгк/Сфк | K _{Г-П} |
|--|--------|------------------|------|------|------|------------------|------|------|----------|---------|------------------|
| | | Ia | I | II | III | I | II | III | | | |
| 1. Светло-серая | | | | | | | | | | | |
| Ап | 1,26 | 4,8 | 11,9 | 9,2 | 17,5 | 19,8 | 7,9 | 7,9 | 20,6 | 0,82 | 7,53 ± |
| А1 | 1,07 | 6,5 | 9,3 | 11,2 | 18,7 | 16,8 | 7,5 | 9,3 | 20,6 | 0,73 | 0,27 |
| 2. Светло-серая глубокооглеенная | | | | | | | | | | | |
| Ап | 1,02 | 4,9 | 14,9 | 9,8 | 20,6 | 18,6 | 7,8 | 7,8 | 16,7 | 0,70 | 7,32 ± |
| А1 | 0,79 | 6,3 | 13,9 | 10,1 | 19,0 | 22,8 | 8,9 | 5,1 | 13,9 | 0,74 | 0,34 |
| 3. Светло-серая поверхностно-слабооглеенная | | | | | | | | | | | |
| Апг | 1,10 | 4,5 | 10,9 | 9,1 | 19,1 | 18,2 | 12,7 | 6,4 | 19,1 | 0,85 | 6,64 ± |
| А1г | 1,06 | 4,7 | 11,3 | 10,4 | 18,9 | 17,9 | 12,3 | 5,7 | 18,9 | 0,79 | 0,29 |
| 4. Светло-серая поверхностно-сильнооглеенная | | | | | | | | | | | |
| Апг | 1,60 | 4,4 | 10,0 | 8,1 | 12,5 | 17,5 | 14,4 | 10,0 | 23,1 | 1,20 | 5,56 ± |
| А1г | 1,29 | 6,2 | 16,3 | 9,3 | 9,3 | 16,3 | 17,1 | 7,0 | 18,6 | 0,98 | 0,37 |
| 5. Светло-серая поверхностно-глеевая | | | | | | | | | | | |
| Апг | 1,24 | 4,0 | 13,7 | 12,9 | 14,5 | 15,3 | 12,9 | 7,3 | 19,4 | 0,79 | 4,50 ± |
| А1г | 1,13 | 4,4 | 12,4 | 9,7 | 15,9 | 15,9 | 15,9 | 6,2 | 19,5 | 0,90 | 0,23 |

Содержание органического вещества в светло-серых почвах невысокое (менее 2%), соотношение Сгк:Сфк составляет 0,7-0,9. Только в пахотном горизонте поверхностно-сильнооглеенной почвы Сгк:Сфк достигает 1,2. Среди фульвокислот преобладают наиболее агрессивные I и Ia фракции, Соотношение гуминовых кислот определяется содержанием ила и застоем влаги в гумусовых горизонтах. В незаболоченных светло-серой и светло-серой глубокооглеенной почвах резко преобладает I фракция. В гумусовых горизонтах поверхностно-оглеенных почв возрастают содержание ила в и доля II фракции. Кроме того,



при поверхностном застое влаги часть гуминовых кислот I фракции разрушается, о чем свидетельствуют гумусовые потеки в нижних горизонтах.

Таким образом, увеличение ила в пахотных горизонтах является следствием и причиной поверхностного застоя влаги, и в свою очередь определяет изменения в составе органического вещества светло-серых поверхностно-оглеенных почв. Следовательно, для количественной оценки степени их гидроморфизма применим показатель, основанный на соотношении оптической плотности щелочной и щелочной пирофосфатных вытяжек из гумусового горизонта. Проведенные исследования позволили предложить следующие градации по значению этого показателя: $K_{I-II} > 7$ - незаболоченные светло-серые и светло-серые глубокооглеенные почвы (поверхностный застой влаги отсутствует в независимости от влажности года); $K_{I-II} = 6-7$ - светло-серые поверхностно-слабооглеенные почвы (кратковременный застой влаги, существенно не влияющий на продуктивность зерновых); $K_{I-II} < 6$ – светло-серые поверхностно-сильнооглеенные и глеевые почвы (в средние и влажные годы вымочки сельскохозяйственных культур или значительное снижение урожайности).

Выводы

1. Характерной особенностью светло-серых и светло-серых поверхностно-оглеенных почв на пылевато-песчаных отложениях, подстилаемых разнородными песками является вертикальная дифференциация по илу.

2. Обеднение илом гумусовых горизонтов не заболоченных светло-серых почв сопровождается резким сужением диапазона активной влаги и снижением водоудерживающей способности почв, в результате урожайность сельскохозяйственных культур резко снижается в засушливые и даже средние годы.

3. Накопление ила в гумусовых горизонтах светло-серых поверхностно-оглеенных почв является причиной застоя влаги в средние и влажные годы, что приводит к снижению урожайности и гибели с.-х. культур.

4. Содержание органического вещества в светло-серых и светло-серых поверхностно-оглеенных почвах 1,2- 1,6 %, соотношение $C_{гк}:C_{фк}$ менее 0,7-1,2. Среди фульвокислот преобладают I и Ia фракции. Среди гуминовых кислот в неоглеенных почвах преобладает I фракция, в поверхностно-оглеенных – возрастает доля II фракции

5. Критерий K_{I-II} полностью отражает эколого-гидрологические особенности светло-серых и светло-серых поверхностно-оглеенных почв севера Тамбовской равнины.

Литература

1. Ахтырцев Б.П. Ахтырцев А.Б. Почвенный покров Среднерусского Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1993. 215с.
2. Ахтырцев Б.П. Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1979. 233 с.
3. Даутоков И.М., Красин В.Н. Степанцова Л. В. Деградация свойств светло-серых супесчаных почв севера Тамбовской равнины под влиянием поверхностного заболачивания/ Сб. тр. Межд. конф. «Проблемы деградации и охраны почв» Москва: РГАУ им. К. А. Тимирязева. 2017. С. 137.



4. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. Методы количественной диагностики степени гидроморфизма черноземовидных почв севера Тамбовской равнины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение, 2012, № 1. С.

5. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н., Даутоков И.М., Красина Т.В. Светло-серые поверхностно-оглеенные супесчаные почвы севера Тамбовской равнины: агроэкология, свойства и диагностика// Почвоведение, 2018. № 4. С. 413-426.

6. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б.; Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения, способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013 – 352с.

7. Зайдельман, Ф.Р. Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Волохина В.П. Темно-серые почвы на двучленных отложениях севера Тамбовской равнины: Агроэкология, свойства и диагностика // Почвоведение. 2012. №5. С. 515-529.



УДК 631.4

ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ

Егоров Ю.В., Судницын И.И., Кириченко А.В.

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
yury-egorov@mail.ru

Annatation. Due to length 20 meters electrical capacity sensor allows to determine average data of the soil-moisture content along all its extension. It is made in the form of a bundle of insulated conductors that is in the root layer under the plants. The sensor was used in the automatic irrigation system under drip irrigation. We have seen the harvest growth of up to 20-30% owing to the maintenance of the optimal soil moisture.

Основным результатом научно-исследовательской деятельности профессора Анатолия Даниловича Воронина было создание перспективного научного направления – структурно-функциональной гидрофизики почв. В рамках этого направления им были проведены поиски взаимосвязи между влажностью (W) почв и давлением почвенной влаги (ДПВ) и разработана оригинальная методика измерения ДПВ.

В данной работе предприняты усилия для создания метода измерения ДПВ и W не только в отдельных точках почвенного пространства, но и для усредненной оценки увлажненности почв на значительных площадях в натуральных условиях. В основу разработанного метода положена взаимосвязь между W и электрической емкостью почв, поскольку относительная электрическая проницаемость воды (ϵ), равная 81, во много раз выше, чем ϵ сухой твердой фазы почвы, варьирующей в интервале от 3 до 5. При увеличении W ϵ увеличивается до 30 – 40. Электрическая емкость конденсатора, между пластинами которого находится такая почва, в 30 – 40 раз больше, чем электрическая емкость конденсатора, между пластинами которого находится воздух.

В агрономической и почвенной практике используются электроемкостные влагомеры, электроды которых располагаются в увлажненной почве. Электроды служат обкладками конденсатора колебательного контура. При изменении W происходит изменение частоты колебаний генератора.

Используются также диэлькометрические головки, опускаемые в пластиковую трубу, находящуюся в почве в вертикальном положении.

Измерения ϵ почв обычно проводятся на высоких частотах (от 0.1 до 11 ГГц), поскольку при использовании низких и средних частот результаты могут быть недостоверными. Однако необходимо иметь в виду, что использование высоких и сверхвысоких частот в диэлектрических влагомерах накладывает определенные ограничения на размер электродов. Критической их величиной является четверть длины волны в диэлектрике. При этом

$$L_{кр} = 3 \cdot 10^8 / 4f \sqrt{\epsilon_d}, \quad (1)$$

где f – частота тока, ϵ_d – диэлектрическая проницаемость электропроводящей среды.

Так, например, если ϵ почвы равна 14, то при частоте 0.1 ГГц $L_{кр} = 0.2$ м, а при частоте 1 ГГц $L_{кр} = 0.02$ м. Длина электродов должна быть меньше $L_{кр}$ (1), иначе в электродах могут возникнуть волновые и резонансные явления, что исказит полученные результаты. Но для определения средней влажности почв на больших мелиорированных площадях необходимо увеличить длину электродов по крайней мере до 20 м, поскольку расстояния между дренами или поливными устройствами часто близки к этой величине. Для этого в



соответствии с зависимостью (1) необходимо снизить частоту тока до 1 мГц. Разработке такого датчика и посвящена данная работа.

Для измерения электрической емкости (С) почвы на большой площади необходимо использовать обкладки конденсатора большой площади. В этом случае в качестве конденсатора можно использовать двужильный провод, уложенный в почве на некоторой глубине с минимальным нарушением ее сложения. Измеряется электрическая емкость между жилами проводника. Длину провода определяют по выражению (1). Так, например, при частоте 0,5 мГц и $\epsilon = 15$, $L_{кр} = 20$ м. В представленной работе была использована именно такая длина проводов.

Самое большое емкостное электрическое сопротивление сосредоточено в изоляции электродов, поэтому сила тока в цепи определяется, в основном, его величиной. При увлажнении почвы капилляры заполняются влагой, площадь их водных менисков увеличивается, что приводит к увеличению смоченной поверхности изоляции электродов. Это, в свою очередь, приводит к увеличению электрической емкости датчиков. Низкая частота тока уменьшает чувствительность датчиков к изменению электропроводности почвенного раствора и температуры почвы.

Влияние структуры и обработки почвы на точность определения влажности почвы

Практика показала, что в течение сезона вегетации не происходит существенных изменений структурности почвы, которые потребовали бы корректировки электроемкостных датчиков. Такие изменения могут произойти лишь при обработке почвы в зоне их закладки или в результате полного иссушения почвы. Однако в нормально функционирующей мелиоративной системе, поддерживающей оптимальную влажность почвы, этого не происходит. Электрические характеристики датчиков существенно меняются лишь в зимний период, при замерзании и оттаивании почвы, что влияет на характер контакта датчиков с почвой.

Срок службы датчиков не менее 4 лет. Небольшие повреждения изоляции не сказываются на его работе.

Влияние структуры на характеристики электроемкостных датчиков было обнаружено в различных типах почв. Крутизна характеристик $C = f(W)$ увеличивается в структурных почвах и уменьшается - в бесструктурных. Кроме того, начальная электрическая емкость электроемкостных датчиков в бесструктурных почвах больше, чем в структурных.

Это подтверждает гипотезу о важной роли контактов почвенных агрегатов с поверхностью изоляции электродов. В сухой структурной почве площадь таких контактов невелика, но она существенно увеличивается при увлажнении. В сухой бесструктурной почве, которая хорошо прилегает к электроду, площадь их контакта гораздо больше, чем в сухой структурной, поэтому электрическая емкость датчиков также гораздо больше, чем в сухой структурной почве, и не может значительно увеличиваться при увеличении влажности почвы. Поэтому при использовании электроемкостных датчиков необходимо учитывать возможные изменения структуры почвы при ее рыхлении или, наоборот, уплотнении.

Влияние температуры почвы

Эксперимент с нагревом и охлаждением почвы был проведен в изолированной от атмосферы кювете, исключающей испарение из почвы. По результатам наблюдений определено влияние температуры на изменение показаний электроемкостных датчиков. Изменение температуры на 1°C для тензиометров приводило к изменению их показаний,



соответствующих изменению влажности дерново-подзолистой почвы на 0,023% от массы почвы, а на черноземе – на 0.023%.

Для электроемкостных датчиков изменения их показаний соответствовали на дерново-подзолистой почве 0,1% и на черноземе - 0,2%.

В открытом грунте суточные колебания температуры в корнеобитаемом слое не превышали 4°C, но недельные и месячные колебания достигали 15°C. В результате погрешность измерений ДПВ тензиометрами соответствовала влажности почвы 0,35% на обеих почвах. Погрешность же измерений влажности электроемкостными датчиками достигала 1,5% на дерново-подзолистой почве и 3% на черноземе. Следовательно, необходимо проводить термокомпенсацию электроемкостных датчиков.

Временная стабильность показаний электроемкостных датчиков

Был также проведен длительный (20 суток) опыт по поддержанию влажности тепличного кокопитового субстрата на постоянном уровне, равном полевой влагоемкости (ПВ), при помощи небольших ежедневных поливов. За все время опыта электрическая емкость датчика увеличилась с 365 пФ до 370 пФ, т.е. всего лишь на 5 пФ, что соответствует изменению влажности, равному 2,6% от массы почвы.

Полевые опыты на открытом грунте

Работа проводилась на плантации цветной капусты на дерново-подзолистой окультуренной почве. Перед посадкой растений было проведено внесение компоста (30 т/га) и известкование (8 т/га). Площадь опытного участка была разбита на две равные половины – опытную и контрольную. На опытном участке использовалось автоматическое капельное орошение. На контрольном участке полив производился дождеванием при снижении влажности почвы до 80% от ПВ. Расчетная норма полива на контрольном участке обеспечивала поддержание влажности почвы в слое 0–30 см на уровне ПВ. Электроемкостные датчики были откалиброваны по показаниям тензиометров, а именно: поливы производились при значении ППВ, равном – 0,08 атм.

В табл. 1 приведены месячные и декадные объемы поступления воды на участки.

Таблица 1. Поступление воды, т/га

| Месяц | июль | | | август | | | сентябрь | | | Сумма |
|----------------------------|------|-----|-----|--------|-----|-----|----------|-----|---|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | |
| Декада | | | | | | | | | | |
| Осадки | | 390 | 65 | 54 | 391 | 563 | 154 | 212 | | 1840 |
| Полив опытного участка | 25 | 25 | 503 | 854 | 516 | | | | | 1923 |
| Полив контрольного участка | 43 | 43 | 116 | 1545 | | | | | | 1747 |

Количество поливной воды на опытном участке было на 10% больше, чем на контрольном. На 95-й день опыта урожай соцветий на контрольном участке достиг 44,7 т/га, а на опытном - 58,6 т/га, т.е. он был на 30% больше, чем на контрольном участке. Увеличение урожая на опытном участке было вызвано более равномерным поступлением поливной воды и более точным поддержанием оптимального уровня влажности (ПВ). Снижение урожайности на контрольном участке было вызвано дефицитом влаги с 33-го по 37-й день опыта, когда ДПВ снижалось до – 0,48 атм.

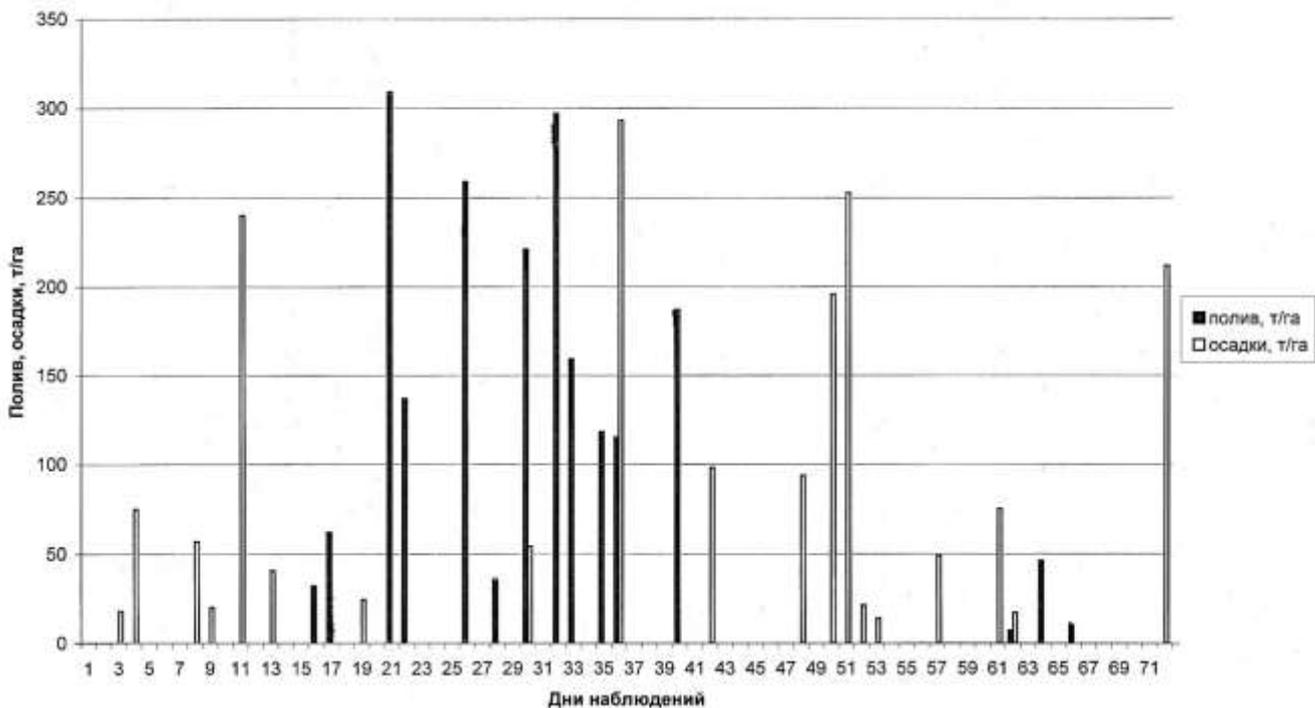
Сравнивая два способа управления поливом (при помощи тензиометров или электроемкостных датчиков) следует отметить, что электроемкостные датчики удобны в



эксплуатации, надежны, дешевы и долговечны, однако, они чувствительны к изменению структуры и плотности почвы. Показания тензиометров не зависят от структуры и плотности почвы, но они хрупки и требуют гораздо больше времени для обслуживания. Наиболее перспективным представляется совместное использование обоих методов. Для этого сначала по тензиометрам следует установить оптимальную влажность почвы, а затем использовать электроемкостные датчики, по показаниям которых в дальнейшем поддерживается установленный оптимальный уровень влажности.

Практика использования электроемкостных датчиков доказала, что после укоренения растений свойства этих датчиков стабилизируются, что позволяет эффективно использовать их в течение всего вегетационного периода.

Данные о поливе и осадках на цветной капусте (т/га) с июля по сентябрь 2012 года, испр.



Заклучение

В условиях натурального полевого эксперимента установлено, что использование протяженного электроемкостного датчика с командным устройством дает возможность в условиях капельной системы орошения автоматически управлять поливным режимом и оптимизировать влажность почвы, увеличивая тем самым урожай сельскохозяйственных культур.

Использование такой системы управления поливом позволяет за счет повышения урожайности компенсировать затраты на создание этой системы уже через год после ее введения в эксплуатацию.



ДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ И РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В МОНОЛИТНЫХ И НАСЫПНЫХ ОБРАЗЦАХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ РАЗНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА: МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Ильина Д.А., Гасина А.И.

Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
ilina.daria0107@gmail.com

Механизмы передвижения влаги в поровом пространстве почв начали изучать ещё в прошлом веке за рубежом. Вместе с водой в почвенной толще происходит перенос растворенных веществ, как питательных, так и загрязняющих. Появление последних в водоемах вследствие миграции из грунтовых вод и послужило толчком к началу активных исследований в 1980-х годах [2]. Не подлежит сомнению, что передвижение влаги зависит от многих физических свойств почвы, таких как ее структура, гранулометрический состав, плотность, порозность и т.д., однако за счет уникальности строения разных образцов почвы вывести общую закономерность, подходящую ко всем, нельзя. Например, песчаные почвы обычно имеют высокий коэффициент фильтрации, > 550 см/сут, в то время как для суглинистых почв его среднее значение колеблется от 20 до 100 см/сут[3]. Однако даже глинистая почва может иметь коэффициент фильтрации более 60 см/сут, если она хорошо оструктурена, и эта структура является водостойчивой, что можно наблюдать в черноземах на глинах или в ферраллитных почвах. И напротив, песчаные почвы могут иметь Кф до нескольких десятков или даже единиц см/сут, если они слоистые. Таким образом, перед учеными открывается широкое поле для исследования, чем и обусловлена актуальность выбранной мной темы исследования. Целью исследования явилась оценка скоростей фильтрации влаги, исследование интенсивности миграции ионов калия и хлора в пахотных горизонтах дерново-подзолистой почвы разного гранулометрического состава.

Для сравнительного анализа передвижения влаги и растворенных веществ в насыпных почвенных образцах, имитирующих ситуацию сразу после нарушающей внутреннее строение почвы вспашки, и в почвенных монолитах, был проведен лабораторный фильтрационный эксперимент по изучению движения влаги и раствора хлорида калия. В качестве объекта исследования выступили образцы пахотного горизонта дерново-подзолистой среднесуглинистой и супесчаной почв, взятых соответственно из Московской области вблизи поселка Ельдигино и из Тверской области. Опыты проводились по стандартным методикам[1] с получением динамики коэффициента фильтрации и выходных кривых исследуемых ионов. Результаты проведенных лабораторных исследований позволяют судить о том, как изменения в строении почвенного пространства влияют на влагопроводящую и сорбционную способность дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава.

Литература

- Теории и методы физики почв/ под ред. Шеина Е. В. и Карпачевского Л. О. М.: Гриф и К, 2007.
Умарова А. Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М: ГЕОС, 2011.
Шейн Е. В., Гончаров В. М. Агрофизика. М: Феникс, 2006.



УДК 631.43

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ МИГРАЦИИ ПЕСТИЦИДОВ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОЧВАХ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВ

Кокорева А.А.¹, Белик А.А.^{1,2}, Колупаева В.Н.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

kokoreva.a@gmail.com

²ВНИИ Фитопатологии, Б. Вяземы, Московская область, Российская Федерация

EXPERIMENTAL SUPPORT OF PESTICIDE MIGRATION MODELS IN CRACKED SOIL AND
QUANTITATIVE ASSESSMENT OF HETEROGENEITY FLOWS OF SUBSTANCES

Kokoreva A.A.¹, Belik A.A.^{1,2}, Kolupaeva V.N.²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²All-Russian Scientific Research Institute of Phytopathology, Bolshie Vyazemy, Moscow reg., Russia

Annotation: Physically based models of substance behavior in soils require layer-by-layer input of experimental soil support. Important parameters affecting the migration of substances are those that are responsible for water mobility. Therefore, it is very important to know the structure of pore space of soil to improve the accuracy of prediction.

Введение

В процедурах регулирования обращения с пестицидами как в Европе, США, так и в России широко используются физически обоснованные миграционные модели. Для работы модели требуется задание верхнего граничного условия (метеонаблюдения), нижнего граничного условия (зависит от почвенного и гидрологических условий), а также послойного задания почвенного экспериментального обеспечения: физические свойства (гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества, коэффициент фильтрации и т.д.), параметры аппроксимации ОГХ.

В основу положено уравнение конвективно-диффузионного переноса, но так как поровое пространство почв имеет сложное строение с влагопроводящими путями различных размеров и формы, в современных моделях учитывается транспорт по преимущественным путям (макропорам, трещинам). Особенность этих внутрпочвенных путей миграции веществ состоит в том, что большая часть веществ, передвигающаяся с почвенными растворами, не успевает взаимодействовать с почвенной матрицей и в сравнительно короткие сроки может оказаться в грунтовых водах (Katagi, 2013). Существуют разные физические обоснования и подходы к моделированию этого сложного и неоднозначного явления — быстрого переноса веществ по макропорам. Более точные модели сложны в использовании из-за множества трудноопределяемых параметров, которые важны с точки зрения устройства их физического обоснования и конечных результатов. Возможным выходом из данной ситуации может стать настройка более простых моделей. В наших предыдущих работах (Шеин и др., 2017, Шеин и др., 2016) было показано, что, несмотря на улучшение прогноза и снижение ошибок моделирования при стандартной параметризации на основании полевых данных, модели нуждаются в адаптации, которая должна включать не только стандартный набор почвенно-климатического обеспечения, но и параметры, отражающие строение порового пространства, наличие крупных пор и ответственные за глубину проникновения пестицида.



Объекты и методы

Модель PEARL 4.4.4

Модель PEARL 4.4.4 – физически обоснованная модель, которая активно применяется при процедуре регистрации пестицидов в России, стандартные сценарии разработаны ВНИИ фитопатологии. PEARL для описания движения воды использует модель SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant), в которой к конвективно-диффузионному переносу добавлен транспорт по макропорам (пользователю не доступна параметризация преимущественного транспорта), а поровое пространство поделено на 2 домена: 1 – поры, продолжающиеся на протяжении всего профиля, "main bypass domain", и 2 – поры, заканчивающиеся на разных глубинах, "internal catchment domain" (Berg et al., 2016; Shein et al., 2018). К сожалению, есть существенное ограничение в работе этой модели: пользователь не имеет возможности параметризовать уравнения, описывающие разделение пор на макро- и микродомены, поэтому имитации явления преимущественной миграции пестицида возможно корректировка параметра шаг смещения (λ), описывающего явление размыва фронта движущегося раствора с помощью явлений диффузии и дисперсии (Shein et al., 2018, Шеин и др., 2017).

Модель MACRO 5.0

Данная модель относится к типичным преимущественно потоковым моделям – preferential flow models, учитывающим явление миграции веществ по макропорам и трещинам (Prado et al., 2011). Как и в последней версии PEARL модель MACRO делит поровое пространство почвы на два домена, каждый из которых характеризуется своей концентрацией раствора и скоростью потока. Для расчета массообмена между доменами используется физически обоснованный подход, и по сравнению с PEARL требуется четыре дополнительных параметра: доля сорбционных центров в каждом домене, диффузионная длина пути, индекс распределения пор по размеру (Шеин и др., 2009).

Методы оценки неоднородности потоков

Для определения численных значений шага смещения проводились лабораторные и полевые эксперименты. В качестве объекта исследования выбрана агродерново-подзолистая почва Пушкинского района Московской области, также для последующей настройки физически обоснованных моделей на опытной делянке был проведен эксперимент по изучению миграции среднеподвижного ($K_{oc}=241$ см³/г) и среднестойкого ($DT_{50}=34$ сут.) пестицида циантранилипрола. Лабораторный фильтрационный эксперимент выполнялся по стандартной методике (Теории и методы физики почв, 2007) для ненарушенных малых монолитов длиной 10 см и диаметром 5 см, отобранных с различных глубин (0, 10, 20, 30, 40 и 50 см) и больших монолитов из пахотного и подпахотного горизонтов диаметром 10 см и длиной 30 и 20 см соответственно. Методика полевого эксперимента с движением красящего вещества подробно описана в статье Шеин и соавторов (Shein et al., 2018).

Наиболее информативным методом изучения порового пространства почв на сегодняшний момент является томографический анализ. Данный способ позволяет изучать поровое пространство в ненарушенном виде при любой влажности. Исследования проводились с помощью геологического томографа с разрешением 200 мкм на пиксель, что позволило выделить поры диаметром более 1 мм. Были использованы те же большие монолиты, что и в лабораторном фильтрационном эксперименте. Согласно Роуэллу (1998) эти поры относятся к разряду макропор и переносят до 90% воды и веществ в почве. Съёмка почвенных монолитов проводилась до и после капиллярного насыщения. Далее обсчет результатов производился в специализированных программах по работе с томографическими снимками.



Результаты и обсуждение

Оценка результатов лабораторного фильтрационного эксперимента показала, что небольшой масштаб монолитов не позволяет оценить изменчивость порового пространства почвы. Значения шага смещения растут с увеличением масштаба выбранных объектов, возрастая с увеличением изучаемого масштаба порового пространства (мощность и диаметр монолита) (таб. 1). Повторности различаются, скорость фильтрации и значения шага смещения зависят от наличия или отсутствия макропор и трещин в монолите.

Таблица 1. Результаты лабораторного фильтрационного эксперимента

| Глубина, см | Скорость фильтрации, см/сут | λ , см |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------|
| Малые монолиты | | |
| 0-10 | 132 | 5 |
| 10-20 | 57 | 3.5 |
| 20-30 | 97 | 7.5 |
| 30-40 | 62 | 13 |
| 40-50 | 55 | 5.6 |
| 50-60 | 99 | 5.6 |
| Большие монолиты для томографии | | |
| 0-30 | 176 | 26 |
| 30-50 | 111 | 48 |

Полевой фильтрационный эксперимент проводился в трехкратной повторности, рассчитаны средние значения параметра. Для поверхностного слоя и глубины 5 см фронт движения вещества равномерный с хорошо видимой границей, значения шага смещения – 4 и 2 см соответственно, с увеличением глубины фронт размывается, граница становится языковатой. Для глубины 20 см шаг смещения был 12 см, для 40 см – 9 см и для 60 см и глубже – больше 20 см (Shein et al., 2018).

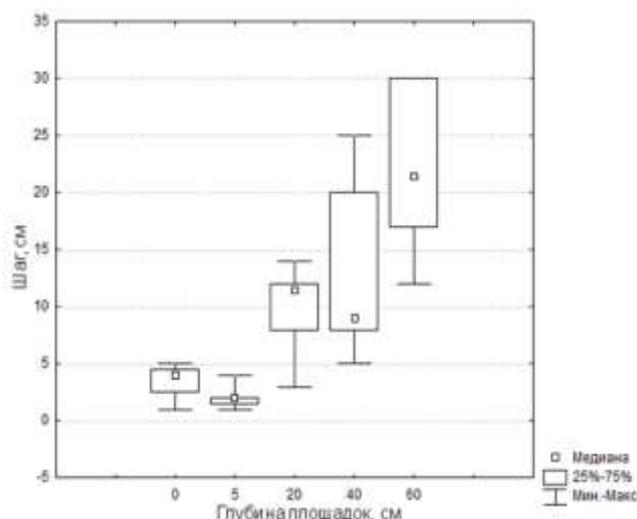


Рис. 1. Статистики полевых определений шага смещения

Полученные в ходе томографического анализа данные очень хорошо соотносятся с нашими предыдущими исследованиями по определению шага смещения. На графиках (рис. 2) видно, что для нижнего горизонта размер пор значительно меньше, причем очень много



мелких пор, и лишь незначительное количество крупных. Монолиты подпахотного горизонта практически не отличаются друг от друга (общая пористость около 4%, около 40% пор составляют закрытую порозность). Тогда как для верхнего горизонта наблюдается сильный разброс по величине пор, поровое пространство представляет собой разветвленную систему пор и крупных трещин. При набухании средний размер пор увеличивается, то есть вклад в водопродность вносят в основном более крупные поры. На основании 2D-анализа объем порового пространства для верхнего горизонта варьирует между монолитами, составляя 6-9%, для нижнего горизонта - порядка 2,5%.

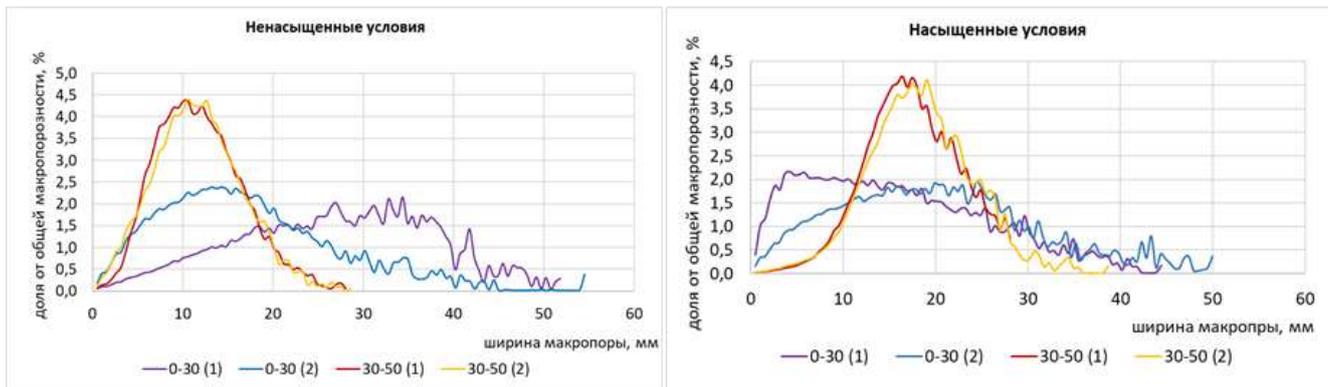


Рис. 2. Распределение пор по размерам (3D анализ)

Апробации значений шага смешения при моделировании миграции пестицидов можно провести с помощью модели PEARL. На основании сравнения экспериментальных и прогнозных данных (рис. 3) и анализа ошибок (SRMSE) прогноза моделирование миграции пестицида с шагом смешения 5 см (рекомендован разработчиками модели) и со значениями, определенными в лабораторных экспериментах, результаты прогноза очень близки. Однако моделирование с использованием полевых значений шага смешения лучше описала поведение пестицидов, особенно в нижних слоях, снизив SRMSE (табл. 2).

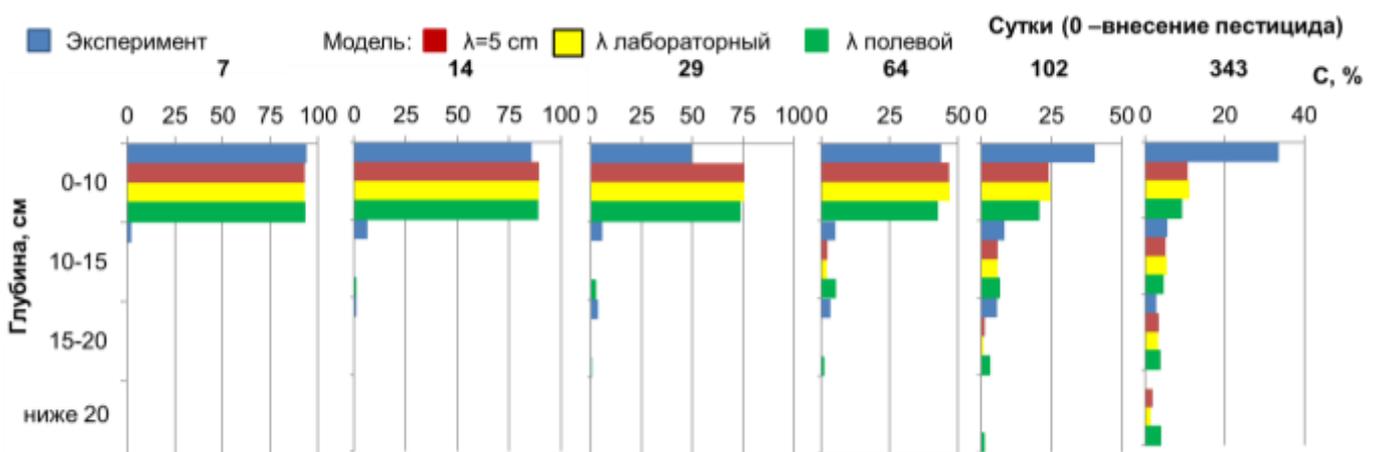


Рис. 3. Распределение пор по размерам (3D анализ)

Таблица 1. Ошибки прогноза содержания пестицида при различных величинах шага смешения

| Глубина, см | $\lambda = 5 \text{ cm}$ | λ лабораторный | λ полевой |
|-------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
| 0-10 | 0.2281 | 0.2291 | 0.2346 |



| | | | |
|--------------|--------|--------|--------|
| 10-15 | 0.7522 | 0.7554 | 0.5705 |
| 15-20 | 1.0461 | 1.0890 | 0.8048 |
| Весь профиль | 0.19 | 0.19 | 0.19 |

Частичную апробации полученных результатов томографического анализа при моделировании миграции пестицидов можно провести с помощью модели MACRO, разделив поровое пространства на микро- и макропоры согласно результатам съемки, для сравнения моделирование в PEARL проведено без настройки модели. Определенные значения маропорозности по томографии хорошо согласуются с данными по педотрансферным функциям в модели MACRO. На графике (рис. 4) представлена общая динамика разложения пестицида по всему профилю. Прогноз вначале занижает реальное содержание вещества. Однако к 101 дню прогноз MACRO ближе к эксперименту. Также моделирование в PEARL вызывает значительное мигрирование пестицида вниз по профилю. Хотя в действительности пестицид не выходит за пределы 15 см. MACRO не совершает такой ошибки. Но все же не учитывает перемещение вещества в этот срок ниже.

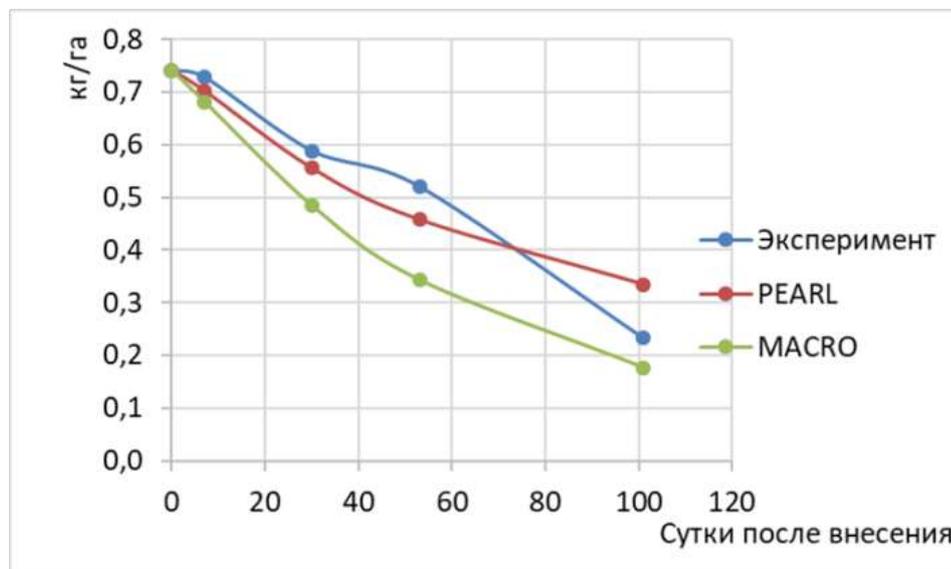


Рис. 4. Динамика разложения циантаранилипрола

Выводы

Изучение структуры порового пространства является важным аспектом в понимании механизмов передвижения веществ в почве. Однако важно не только знать распределение пор по размеру, но и применять полученную информацию для прогнозирования поведения пестицидов. Использование полевого шага смешения позволяет улучшить точность прогноза. А вот использование данных томографического анализа требует масштабной междисциплинарной работы, для возможного физически обоснованного описания структуры порового пространства и ввода уравнений в модели поведения веществ.

Благодарность

Работа выполнена по теме Госзадания № 0598-2014-0011 в ФГБНУ ВНИИФ и при поддержке гранта РФФИ 18-34-00801 мол_a.



Литература

1. Berg, F. van den; Tiktak, A.; Boesten, J.J.T.I.; Linden, A.M.A. van der PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment. WOt-technical report 61, 2016. P. 134.
2. Katagi T. Soil Column Leaching of Pesticides // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 221. 2013. P. 1-105.
3. Prado H.A., Luiz A.J.B., Filho H.C. Computational methods for agricultural research: advances and applications // Inform. Sci. Ref. Hershey, 2011.
4. Shein E.V., Belik A.A., Kokoreva A.A., Kolupaeva V.N. Quantitative Estimate of the Heterogeneity of Solute Fluxes Using the Dispersivity Length Parameter for Mathematical Models of Pesticide Migration in Soils // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 7. P. 797–802.
5. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шеина и Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
6. Шеин Е.В., Белик А.А., Кокорева А.А., Колупаева В.Н., Плетенев В.Н. Прогноз миграции пестицидов в почвах: значение почвенного экспериментального обеспечения // Вестник Московского Университета. Серия 17: Почвоведение. 2017. № 4. С.45-51
7. Шеин Е.В., Кокорева А.А., Горбатов В.С., Умарова А.Б., Колупаева В.Н. Оценка чувствительности, настройка и сравнение математических моделей миграции пестицидов в почве по данным лизиметрического эксперимента. Почвоведение. 2009. № 7. С. 826-835
8. Шеин Е.В., Кокорева А.А., Колупаева В.Н., Белик А.А., Плетенев П.А. Экспериментальная оценка значений параметров переноса агрохимикатов в почве: шаг смешения // Агрохимический вестник. 2016г. №6. С. 20-23.



УДК 631.425.4, 631.425.2, 519.62

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ СВОБОДНОЙ ВОДЫ В ПОЧВЕ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЕЁ МЕЗОСТРУКТУРЫ

Кузьмин И.Ю.¹, Ивонин Д.А.², Федотов А.Б.², Шейн Е.В.¹, Умарова А.Б.¹, Грачёв Е.А.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

²Физический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

HYDRODYNAMICS OF FREE WATER IN THE SOIL BASED ON A THREE-DIMENSIONAL MODEL OF ITS MESOSTRUCTURE

I.Kuzmin¹, D.Ivonin², A.Fedotov², E.Shein¹, A.Umarova¹, E.Grachev²

¹Faculty of Soil Science of Lomonosov State University, Moscow, Russia

²Faculty of Physics of Lomonosov State University, Moscow, Russia

Annotation: 3D+time hydrodynamics is developed at the x-ray tomography scene of soil aggregate, which is created using topology invariants for the binarization of 3D-image. Hydrodynamics simulation software use Lattice Boltzmann Method. The proposed approach allows us to research many problems of soil science, including the migration of dissolved pollutants and nutrients.

Введение

С точки зрения задач анализа физических процессов и явлений, почва является крайне сложным объектом. Поэтому при моделировании физических процессов в почвах используются всевозможные упрощения. Некоторые из этих упрощений можно избежать, используя современные достижения в математической физике вычислительной технике.

Для изучения большинства процессов, происходящих в почве, очень важным фактором устройства почвы является ее трехмерная мезоструктура. Попытки обойтись двумерными или одномерными описаниями часто дают ограниченные, не вполне достоверные результаты. Известны попытки создания довольно сложных эмпирических описаний для двумерных объектов (Skvortsova and Kalinina, 2004). Между тем современная математика, а именно дифференциальная геометрия и топология, дают нам в руки достаточно проработанный аппарат изучения сложных трехмерных мезоструктур.

В данной работе авторы попытались впервые реализовать подход к анализу явлений в почве пользуясь ее реальной мезоструктурой и аппаратом топологии. В качестве примера демонстрации возможностей данного подхода выбран процесс фильтрации свободной воды, который хорошо описывается в сложных трехмерных областях с помощью метода решёточных уравнений Больцмана. Для описания трехмерной структуры почвы были использованы результаты рентгеновской томографии почвенного агрегата, позволяющей создать его трехмерное полутоновое изображение. Применение известных в топологии инвариантов позволило выделить пустотное пространство в трехмерном изображении образца, создав двухфазную (твердая фаза и пустотное пространство) среду, адекватную для решения задач гидродинамики. Гидродинамический вычислительный эксперимент позволил определить значение коэффициента фильтрации почвенного агрегата.

Объекты и методы

Исследуемый образец почвы

Образцы пахотного горизонта агродерново-подзолистой почвы были отобраны в Зеленоградском филиале Почвенного института имени В.В. Докучаева, Пушкинский район, Московская область. Для отобранных агрегатов размером 3-5 мм была проведена



томографическая съемка на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172 в лаборатории физики и гидрологии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева. Экспериментальным методом парафинирования была определена пористость агрегатов, которая составила 36-42%. Один из слоев томографического изображения почвенного агрегата, исследуемого в данной работе, представлен на Рис.1.

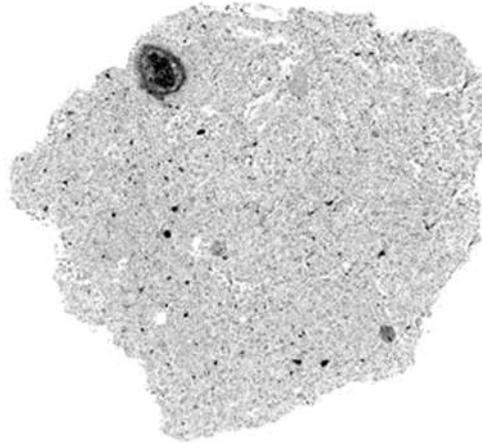


Рис.1. Слой томографического изображения почвенного агрегата, использовавшегося в данной работе

Топологические инварианты для описания мезоструктуры почвенного агрегата

Пусть X – объемное тело, ограниченное поверхностью δX в евклидовом трехмерном пространстве. В случае почвенного агрегата этим объемным телом может быть пустотное пространство (или любая другая фаза, представляющая интерес для исследователя). Тогда для пустотного пространства могут быть определены 4 функционала, полностью описывающие его геометрию. Нулевой функционал равен объему пустот

$$M_0(X) = V(X).$$

Первый функционал равен площади поверхности пустот:

$$M_1(X) = \int_{\delta X} dS = S(X),$$

где dS есть элемент поверхности δX . Второй функционал равен интегралу от средней кривизны поверхности пустот:

$$M_2(X) = \int_{\delta X} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) dS = C(X),$$

где r_1 и r_2 – главные кривизны поверхности dS . Третий функционал равен интегралу от гауссовой (полной) кривизны поверхности пустот

$$M_3(X) = \int_{\delta X} \frac{1}{r_1 r_2} dS = 2\pi\chi(\delta X) = 4\pi\chi(X),$$

где $\chi(\delta X)$ и $\chi(X)$ – характеристики Эйлера-Пуанкаре для поверхности δX и пустот X соответственно.

Характеристика Эйлера-Пуанкаре представляет собой интегральную оценку топологической сложности пустотного пространства и может быть определена как знакопеременная сумма чисел Бетти:

$$\chi(X) = b_0(X) - b_1(X) + b_2(X),$$



где b_0 – число компонент связности, b_1 – число сквозных туннелей, b_2 – число полостей. Стоит отметить, что данные функционалы являются топологическими инвариантами, что означает их аддитивность, непрерывность и инвариантность относительно преобразований поворота и сдвига. Основываясь на этих свойствах, могут быть предложены эффективные алгоритмы вычисления функционалов Минковского для трехмерных структур (Legland et al., 2011)

Данные топологические инварианты могут быть использованы для численного описания внутренней структуры пустотного пространства почвенных агрегатов (Muñoz-Ortega et al., 2015; San José Martínez et al., 2018; Vogel et al., 2010)

Метод решеточных уравнений Больцмана

Метод решеточных уравнений Больцмана (РМБ) является одним из алгоритмов численного моделирования различных процессов переноса (Kupershtokh and Medvedev, 2018). Вычислительный объем в методе разбивается на пространственные ячейки кубической формы, принадлежащие одному из двух классов: пронизываемое пустотное пространство, или непроницаемая твердая фаза. Жидкость моделируется в виде набора псевдочастиц, перемещающихся между пронизываемыми ячейками вдоль заранее заданных дискретных направлений. Эволюция функции распределения плотности вероятности описывается уравнением Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} \vec{p} + \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} \vec{F} = \Omega_{coll},$$

где Ω_{coll} – интеграл столкновений (характеризует изменение числа псевдочастиц за счет их взаимодействия друг с другом), $\vec{F}(\vec{r}, t)$ – поле сил, действующее на псевдочастицы в жидкости, m – масса псевдочастиц. В нашей реализации столкновения учитываются с помощью модели Батнагара — Гросса — Крука (Behrend et al., 1994):

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau} (f_i(\vec{r}, t) - \bar{f}_i(\vec{r}, t)),$$

где $\bar{f}_i(\vec{r}, t)$ – равновесная функция распределения.

Для определения плотности и скорости жидкости можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\rho(\vec{r}_j) = \sum_{0 \leq i \leq Q-1} f_i(\vec{r}_j),$$

$$\vec{v}(\vec{r}_j) = \frac{1}{\rho(\vec{r}_j)} \sum_{0 \leq i \leq Q-1} f_i(\vec{r}_j) e_i,$$

где e_i – шаблон скоростей D3Q19 (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) (Demuth et al., 2017).

Существуют реализации РМБ для моделирования однокомпонентного течения (Захаров et al., 2014), многокомпонентного течения (Liu et al., 2012), диффузии (Yoshida and Nagaoka, 2010) и теплопроводности (Ikeda et al., 2014) без существенных изменений в алгоритме. Алгоритм обладает внутренней параллельностью и может быть реализован для расчетов на графических ускорителях для значительного повышения производительности расчетов



(Бикулов, 2015). Также метод позволяет добавлять в модель дополнительные эффекты: силу тяжести, фазовые переходы и др.

Так как любой программный алгоритм работает с безразмерными величинами, проведена размерная верификация на основе аналитического решения для течения Пуазейля. Время релаксации (используемый в РМБ-алгоритме параметр) определяется из вязкости жидкости (Kruger, 2011).

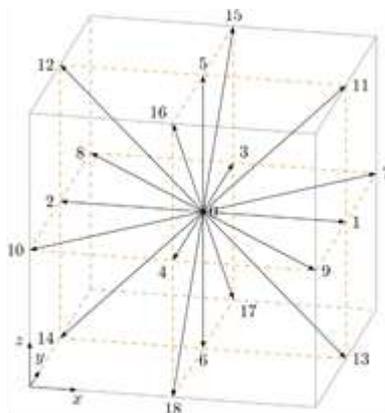


Рис.1. Шаблон скоростей D3Q19 для метода решеточных уравнений

Результаты и обсуждение

Для трехмерного полутонового изображения почвенного агрегата была вычислена зависимость удельных топологических характеристик в зависимости от порога бинаризации: пористость P , удельная площадь поверхности пустот S_V , удельная кривизна поверхности пустот C_V , удельная эйлерова характеристики пустот E_V , где V – общий объем сцены. На основе представленных на Рис.2 графиков были определены границы фаз, а также определен оптимальный порог бинаризации. После выделения пустотного пространства пористость образца составила 39%. Данное значение соответствует табличным величинам пористости для почв пахотного горизонта.

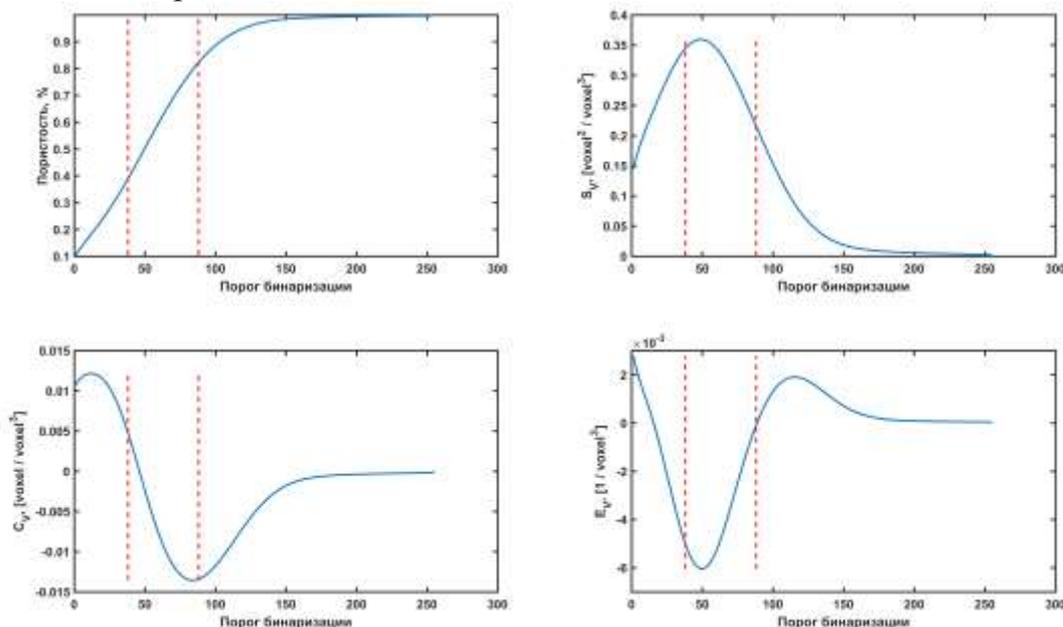


Рис.2. Графики зависимости топологических характеристик почвенного агрегата от порога бинаризации трехмерного полутонового изображения

После выделения пустотного пространства была создана сцена для трехмерного



моделирования протекания свободной воды. Для этого из бинарного изображения агрегата вырезается куб размером 100x100x100 вокселей (соответствует длине ребра 0,5мм в почвенном агрегате), после чего этот фрагмент дважды зеркально отражается относительно боковой грани. В результате конструируется структура, позволяющая корректно поставить периодические краевые условия не только на верхней и нижней плоскости, но и на вертикальных гранях.

Стартуя с покоящегося состояния воды алгоритм РМБ под действием гравитации довольно быстро выходит на стационарное решение по скоростям течения воды во всех точках. Иллюстрация профиля скорости течения жидкости приведен на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, где

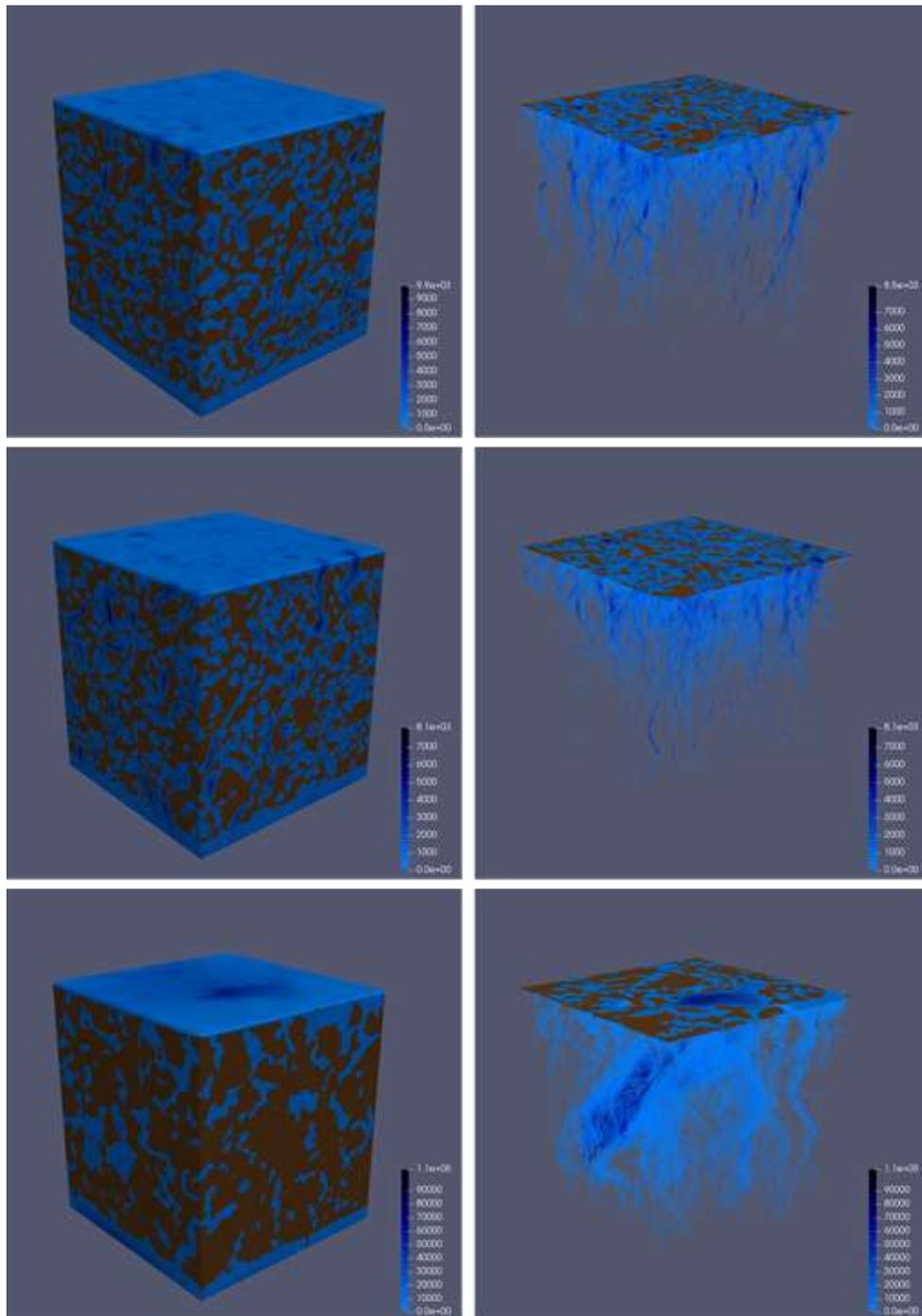


Рис. 1. Результаты моделирования течения жидкости по пустотному пространству почвенного агрегата. Слева – значения скорости течения в см/сутки (коричневым цветом показана твердая фаза, синим – жидкость), справа – линии тока жидкости.

коричневым цветом показана твердая фаза, синим – жидкая. справа твердая фаза была убрана для демонстрации линий тока жидкости внутри почвенного агрегата.

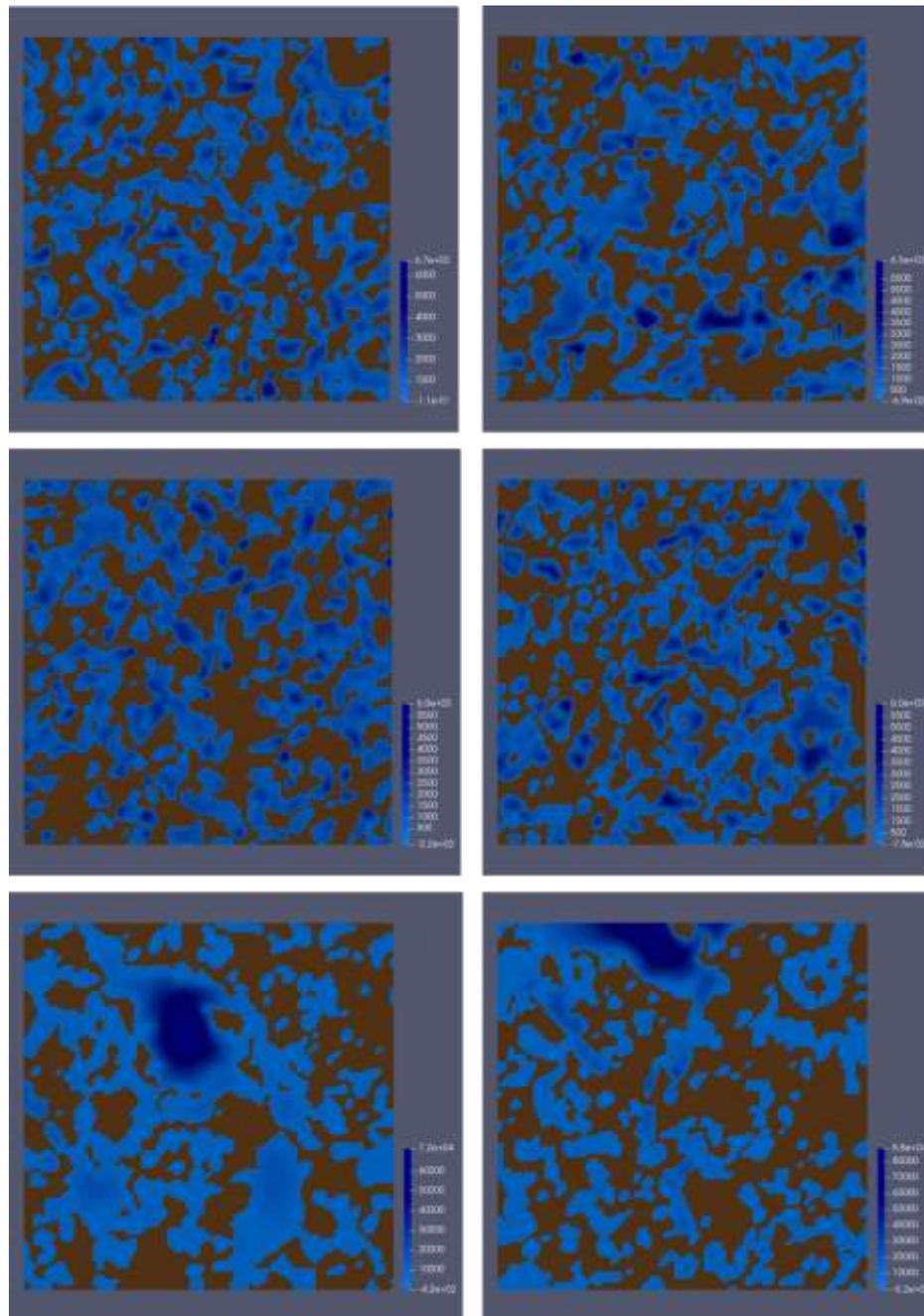


Рис.3. Расчетные значения вертикальной компоненты скорости для куба 1 (верхний ряд) и куба 2 (средний ряд) и куба 3 (нижний ряд). Слева представлены сечения в середине куба, справа - на дне куба.

Как показали расчеты значения вертикальной компоненты скоростей довольно сильно разнятся от точки к точке в зависимости от топологии порового пространства. На Рис.3 представлены поля вертикальной компоненты скорости в двух горизонтальных сечениях трех разных кубов.

Усреднение вертикальной компоненты скорости по горизонтальной поверхности дна куба имеют смысл коэффициента безнапорной (в силу малой толщины слоев воды вне почвенного куба) фильтрации. Они тоже довольно разнятся в зависимости от области усреднения и вырезанных из разных областей одного и того же агрегата кубов. Так для куба 1 получаем коэффициент фильтрации 642см/сут, то же для куба 2 – 624см/сут; для куба 3 коэффициент фильтрации составил 2843см/сут, если рассчитывать коэффициент фильтрации как среднее значение вертикальной компоненты скорости по всей поверхности свободной



воды на дне куба $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$. Таким образом значения для первых двух кубов близки ввиду отсутствия ярко выраженных неоднородностей, а значение для 3-его куба заметно отличается, что объясняется наличием довольно широкой поры в этом кубе.

Определенный интерес также представляет распределение модулей скоростей воды в поровом пространстве, представленные на Рис.6 для исследуемых кубов. По горизонтали отложена скорость в см/сут, по вертикали – процент числа частиц со скоростями в промежутке 50см/сут больше данной скорости. Графики похожи, но демонстрируют

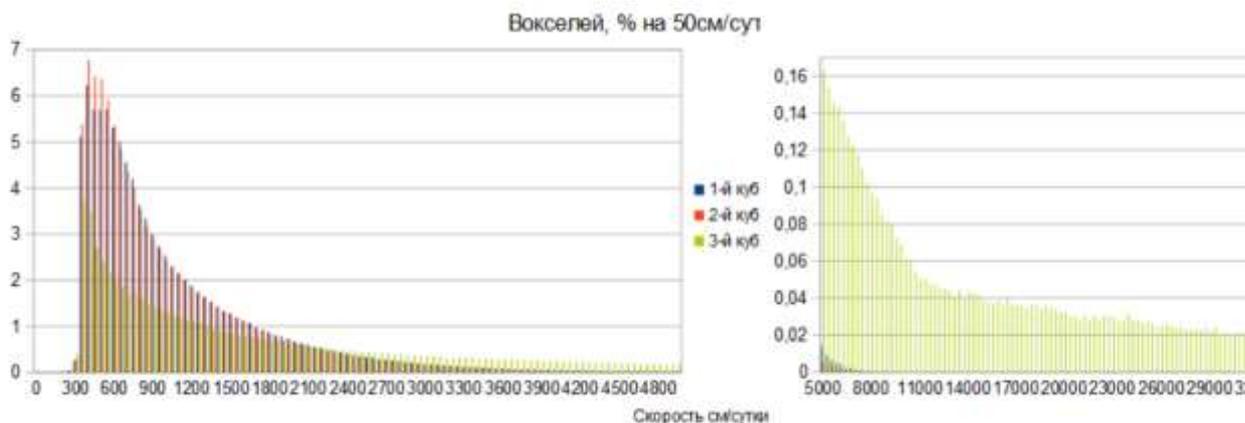


Рис.4. Гистограммы распределения точек по скоростям: слева – для низких скоростей, справа – для высоких скоростей.

различия, вызванные отличиями в мезоструктуре образцов. В кубе 3 за счет наличия сквозной поры диаметром порядка $0,05 \text{ мм}$ скорости выше 34700 см/сут оказываются в $1,3\%$ точек; вместе с тем точек со скоростями ниже 100 см/сут практически не оказалось ни в одном кубе. Максимальные скорости в трех кубах также показательны: 9884 ; 8099 ; 105703 сантиметров в сутки.

Выводы

В данной работе представлен подход к выделению пустотного пространства на трехмерном томографическом изображении почвенного агрегата, основанный на анализе его топологических свойств. Полученное значение пористости почвенного агрегата, равное 39% , соответствует табличным значениям для агродерново-подзолистых почв пахотного горизонта.

На сконструированной сцене было проведено гидродинамическое моделирование течения свободной воды с помощью метода решеточных уравнений Больцмана. Было продемонстрировано сходство вычисленного значения коэффициента фильтрации с экспериментальными измерениями.

Таким образом был развит подход к гидродинамическому моделированию, позволяющий анализировать поток жидкости в такой сложной структуре как почва. Подход позволяет исследовать как локальные, максимально детальные характеристики процесса, так и рассчитывать различные интегральные характеристики процесса гидродинамической фильтрации на различных масштабах. Стоит отметить, что подобный подход может быть применен с включением дополнительных механизмов и параметров для решения различных задач изучения процессов физики почвы, таких как распространение влаги, миграция растворенных загрязнений, питательных веществ и многих других процессов с участием жидких и газообразных фаз. Более того, наш подход является основополагающим и предполагается применить его для исследования других физических процессов в почве,



например, термических. Сцены для моделирования различных процессов могут быть сконструированы по-разному для одного и того же реального объекта, однако алгоритмы моделирования должны определенным образом взаимодействовать в процессе расчётов.

Благодарность

Работа выполнена на базе Лаборатории математического моделирования сложных естественных и инженерных систем МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

- Behrend, O., Harris, R., Warren, P.B., 1994. Hydrodynamic behavior of lattice Boltzmann and lattice Bhatnagar-Gross-Krook models. *Phys. Rev. E* 50, 4586–4595.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.4586>
- Demuth, C., Werzner, E., Mendes, M.A.A., Krause, H., Trimis, D., Ray, S., 2017. Non-Isothermal Simulations of Aluminum Depth Filtration. *Adv. Eng. Mater.* 19, 1700238.
<https://doi.org/10.1002/adem.201700238>
- Ikeda, M.K., Rao, P.R., Schaefer, L.A., 2014. A thermal multicomponent lattice Boltzmann model. *Comput. Fluids* 101, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.06.006>
- Kruger, T., 2011 Unit conversion in LBM. LBM Workshop (Edmonton, Canada), August 22–26, 2011. http://www.timm-krueger.de/downloads/Krueger_Edmonton_scaling.pdf
- Kupershtokh, A.L., Medvedev, D.A., 2018. Lattice Boltzmann method in hydrodynamics and thermophysics. *Journal of Physics: Conf. Series* **1105** (2018) 012058 doi :10.1088/1742-6596/1105/1/012058
- Legland, D., Kiêu, K., Devaux, M.-F., 2011. COMPUTATION OF MINKOWSKI MEASURES ON 2D AND 3D BINARY IMAGES. *Image Anal. Stereol.* 26, 83.
<https://doi.org/10.5566/ias.v26.p83-92>
- Liu, H., Valocchi, A.J., Kang, Q., 2012. Three-dimensional lattice Boltzmann model for immiscible two-phase flow simulations. *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys.* 85, 046309. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.046309>
- Muñoz-Ortega, F.J., San José Martínez, F., Caniego Monreal, F.J., 2015. Volume, Surface, Connectivity and Size Distribution of Soil Pore Space in CT Images: Comparison of Samples at Different Depths from Nearby Natural and Tillage Areas. *Pure Appl. Geophys.* 172, 167–179. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0897-5>
- San José Martínez, F., Martín, L., García-Gutiérrez, C., 2018. Minkowski Functionals of Connected Soil Porosity as Indicators of Soil Tillage and Depth. *Front. Environ. Sci.* 6, 55. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00055>
- Skvortsova, E., Kalinina, N., 2004. Micromorphometric types of the pore space in virgin and plowed loamy soils. *Eurasian Soil Sci.* 37, 980–991.
- Vogel, H.-J., Weller, U., Schlüter, S., 2010. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. *Comput. Geosci.* 36, 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.007>
- Yoshida, H., Nagaoka, M., 2010. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for the convection and anisotropic diffusion equation. *J. Comput. Phys.* 229, 7774–7795.
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.06.037>
- Бикулов, Д.А., 2015. Эффективная реализация метода решеточных уравнений Больцмана для гибридных суперкомпьютерных систем. №2 2018.
<https://doi.org/10.26089/nummet.v16r221>
- Захаров, А.М. Сенин, Д.С., Грачев, Е.А., Моделирование течений методом решеточных уравнений Больцмана со многими временами релаксации, Выч. мет.программирование, 2014, том 15, выпуск 4, 644–657.



УДК 631.4:631.95

ОЦЕНКА РИСКА ТРЕХ ПЕСТИЦИДОВ ДЛЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИХ ОПЫТОВ

Колупаева В.Н.¹, Кокорева А.А.^{1,2}, Белик А.А.^{1,2}, Бондарева Т.А.¹, Астайкина А.А.^{1,2}, Ньюхина И.В.¹

1-ФГБНУ ВНИИ фитопатологии,

v.kolupaeva@vniif.ru

2-Московский Государственный Университет, ф-т почвоведения

kokoreva.agmail@com

V. N. Kolupaeva¹, A. A. Kokoreva^{1,2}, A. A. Belik^{1,2}, Bondareva T.A.¹, Astaikina A.A.^{1,2}, Nuhina I.V.¹

¹ Russian Scientific-Research Institute of Phytopathology

² Lomonosov Moscow State University

Annotation: According to the results of the lysimetric experiment, the migration risk of pesticides is high when evaluated by the maximum concentration in the leachate, and moderate and low - by 80% percentile of concentrations, for aquatic organisms - moderate and low for the two variants, respectively.

Введение

Наличие остатков пестицидов в грунтовых водах является серьезной угрозой для здоровья потребителей питьевой воды. В России это, главным образом, касается сельских населенных пунктов, где 87 % от общего водоснабжения составляет вода из подземных источников (Постановление Правительства РФ N 292, 1998). Во всем мире растет обеспокоенность по поводу загрязнения пестицидами подземных и поверхностных вод. Например, в Дании пестициды обнаруживаются в 5% обследованных скважин (Jorgensen et al., 2012). Погодные условия в большинстве районов РФ (низкие температуры и большое количество осадков) способствуют миграции пестицидов за пределы почвенного профиля. Мониторинг пестицидов, проводимый Росгидрометом, не включает в себя обследование грунтовых вод. Поскольку мониторинг содержания пестицидов в грунтовых водах не ведется, то отсутствуют сведения о наиболее опасных пестицидах и о наиболее уязвимых регионах с точки зрения загрязнения грунтовых вод в РФ.

Оценка риска вымывания пестицидов в подземные воды при регистрации средств защиты растений основана, главным образом, на результатах лабораторных исследований сорбции и миграции пестицидов, данных полевых мелкоделяночных экспериментов, а также результатах моделирования. Однако эти разновидности исследований не дают объективной характеристики вымывания пестицида в поле. Лабораторные исследования не учитывают изменчивость погодных условий, а результаты математического прогноза во многом зависят от типа выбранной модели и объема и качества экспериментального обеспечения к модели по свойствам почв и пестицидов. В отличие от лабораторных опытов лизиметрические исследования позволяют в условиях, максимально приближенных к естественным, изучать поведение токсикантов в почве и получать информацию об их концентрациях в стоке грунтовых вод, что, в определенной степени, позволяет восполнить отсутствующие данные мониторинга.

Целью данной работы было изучить миграцию инсектицида циантринилипрола, регулятора роста с фунгицидными свойствами паклобутразола и гербицида метрибузина в дерново-подзолистой почве в лизиметрическом эксперименте, провести оценку опасности и риска применения этих пестицидов, используя данные полученные данные, а также



показатели сорбции, подвижности и результаты моделирования. Для исследования были выбраны два новых пестицида – циантранилипрол и паклобутразол, которые имеют потенциал использования на территории РФ, и метрибузин, который широко применяется в нашей стране и часто обнаруживается в грунтовых водах в других странах.

Объекты и методы

Пестицид

Циантранилипрол – инсектицид системного действия из группы антрациламинов, в зависимости от почвенных условий его персистентность варьирует от очень низкой до умеренной (DT_{50} 8,7-91,9 суток), подвижность умеренная (K_{oc} 157-367); паклобутразол – регулятор роста растений с фунгицидными свойствами, стойкость – от умеренной до очень высокой (DT_{50} 27-618 суток по лабораторным данным), подвижность – от высокой до низкой (K_{foc} 34,7-665,3 мл/г); метрибузин – системный гербицид из группы триазинонов, нестойкий (DT_{50} 4,7-12,5 суток), подвижность варьирует от очень высокой до умеренной (K_{foc} = 3,1-81,5) (The PPDB, 2019).

Лизиметры Почвенного стационара МГУ

Площадь лизиметра составляет 8 м², глубина – 1,5 м. Почва лизиметров – дерново-подзолистая среднесуглинистая ($pH_{водн.}$ – 5,8, $C_{орг.}$ – 2,18%).

Лизиметрический эксперимент

Пестициды вносили в лизиметр с помощью ранцевого опрыскивателя в максимально рекомендованной и восьмикратной дозах: циантранилипрол – дважды в июне 2015 и 2016 годов в дозах 0,4 и 3,2 кг/га, паклобутразол – в июне 2015 в дозах 0,125 и 1,0 кг/га, метрибузин – 0,98 и 7,7 кг/га соответственно. Образцы лизиметрического стока отбирали 1-2 раза в месяц. Кроме этого регулярно фиксировали объем водного стока из лизиметра.

Определение пестицидов в воде

Количественное определение содержания пестицидов в воде проводили в соответствии с методическими указаниями (МУК 4.1.3207-14, 2015; МУК 4.1.2785-10, 2011; МУК 4.1.1405-03, 2006).

Индексы миграционной опасности

Наиболее простым показателем подвижности пестицида в системе почва-вода является нормированный на содержание органического вещества коэффициент сорбции, который определяется как распределение пестицида между твердой и жидкой фазами в равновесном состоянии, – K_{oc} . Другой широко применяемый индекс подвижности оценивает вероятность миграции пестицида в грунтовые воды, исходя из параметров сорбции (K_{oc}) и разложения (DT_{50}) (Gustafson D., 1989): $GUS = \log(DT_{50}) \cdot (4 - \log(K_{oc}))$.

Модель PEARL

Расчеты концентраций пестицидов в почвах проводили с использованием модели PEARL, которая используется при регистрации пестицидов в ЕС и РФ, и стандартных сценариев входных данных регионов РФ (Колупаева, 2015).

Результаты и обсуждение

Циантранилипрол обнаружен в стоке лизиметрических вод через 2 недели после внесения в почву в обоих лизиметрах (с рекомендуемой и восьмикратной дозами), концентрации составили 0,8 и 1,5 мкг/л соответственно. Этому способствовало большое количество осадков – за 14 суток после обработки выпало 76,3 мм, за 30 суток – 101,6 мм. В 2015 году в варианте с рекомендованной нормой применения циантранилипрол был



обнаружен в 40% водных образцов (концентрация выше предела обнаружения 0,5 мкг/л), в 2016 – в 91%, в 2017 и 2018 годах – в 72%. Максимальная концентрация циантрилипрола в водном стоке составила 2,6 мкг/л, средняя – 0,6 мкг/л, 80% перцентиль – 0,9 мкг/л (таблица 1).

Таблица 1. Оценка опасности и риска миграции пестицидов в грунтовые воды (сценарий наихудшего случая)

| Пестицид | Концентрация в стоке, мкг/л | | | | K _{oc} , г/см ³ (мин.) | GUS (макс.) |
|---------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--|-------------|
| | Прогноз | Лизиметр, (макс.) | Лизиметр, (сред.) | Лизиметр, (80% перс.) | | |
| Циантрилипрол | 1,9 | 2,6 | 0,6 | 0,9 | 155 | 2,8 |
| Паклобутразол | 16,9(2,6) | 2,5 | 0,5 | 0,1 | 35 | 5,1 |
| Метрибузин | 1,1 | 14 | 0,6 | 0,0 | 3 | 3,0 |

 – уровень риска/опасности высокий,
 – уровень риска/опасности низкий

 – уровень риска/опасности умеренный;

Паклобутразол в лизиметре с рекомендованной дозой в 2015-2016 годах обнаружен в лизиметрических водах дважды – через 2 недели и 2 месяца после обработки в концентрациях 3,0 и 2,1 мкг/л соответственно, в лизиметре с восьмикратной нормой применения обнаружен 6 раз в течение лета, осени и в период весеннего снеготаяния в концентрациях до 26 мкг/л.

Метрибузин при использовании в рекомендованной дозе обнаружен в стоке однократно в концентрации 14 мкг/л (предел обнаружения метода – 1 мкг/л), в восьмикратной норме применения пестицид найден в 73% образцов, максимальная концентрация составила 18 мкг/л, средняя – 2,5 мкг/л.

Более высокая частота обнаружения пестицидов в лизиметрах с высокими дозами свидетельствует о том, что предел обнаружения метода анализа не позволяет определять пестицид в стоке в варианте с рекомендованной нормой. Более высокая частота обнаружения циантрилипрола по сравнению с другими пестицидами, возможно, кроме миграционных свойств пестицида обусловлена, также, более высокими возможностями метода анализа – для циантрилипрола предел обнаружения составил 0,5 мкг/л, для паклобутразола – 2 мкг/л, для метрибузина – 1 мкг/л.

Опасность и риск являются основными понятиями при оценке воздействия на окружающую среду. Под риском понимают вероятность или частоту неблагоприятного события (Швыряев, Меньшиков, 2004). При оценке риска миграции сравнивают концентрации пестицида в грунтовых водах с критериями приемлемого риска. В ЕС принято считать недопустимой концентрацию единичного пестицида выше 0,1 мкг/л и смеси пестицидов – выше 0,5 мкг/л (Directive..., 2006). В РФ при регистрации пестицидов сравнивают концентрации с гигиеническими нормативами в питьевой воде – ПДК_{вод.} и значениями острой (EC₅₀) и хронической (NOEC) токсичности для водных организмов (таблица 2). Предотвращение попадания пестицидов в грунтовые воды представляет собой важную задачу, поскольку грунтовые воды являются уязвимым природным объектом, практически неспособным к самоочищению. Температурные условия, отсутствие микробиологической активности и слабая сорбционная способность грунтов приводят к тому, что пестициды могут длительное время находиться в грунтовых водах в неизменном состоянии. Гигиенические и токсикологические критерии оказываются недостаточно жесткими, чтобы способствовать защите грунтовых вод от загрязнения. Поэтому нами предложено использовать в РФ в качестве приемлемой концентрацию пестицида в



грунтовой воде не выше 1 мкг/л (Колупаева, 2017). Эта концентрация обусловлена возможностями большинства аналитических методов определения пестицидов с помощью ГЖХ и ВЭЖХ, действующих в РФ. Для оценки миграционного риска пестицидов предлагается использовать двухступенчатую процедуру, при которой на первом этапе проводится оценка риска миграции путем сравнения прогнозных и/или экспериментально определенных концентраций с пороговым значением (1 мкг/л), а на втором этапе – оценку риска для млекопитающих и водных организмов.

Таблица 2. Гигиенические и токсикологические показатели пестицидов и оценка риска для млекопитающих и водных организмов по максимальным значениям концентраций в лизиметрическом эксперименте

| Пестицид | ПДК вод, мкг/л | Рыба | | Дафнии | | Высшие растения | |
|-----------------|----------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| | | LC ₅₀ , мкг/л | NOEC, мкг/л | LC ₅₀ , мкг/л | NOEC, мкг/л | LC ₅₀ , мкг/л | NOEC, мкг/л |
| Циантранилипрол | -* | 12600 | - | 20 | - | 12100 | - |
| Паклобутразол | -* | 23600 | 3300 | 33200 | 320 | 8 | - |
| Метрибузин | 100 | 74000 | 5600 | 49000 | 320 | 8 | - |

*– нормативы не разработаны

■ – уровень риска высокий, ■ – уровень риска умеренный; □ – уровень риска низкий

Таким образом, с использованием предложенного критерия для всех изучаемых нами пестицидов по максимальным значениям концентраций в стоке риск миграции в грунтовые воды оценен как высокий, по 80% персентилю – умеренный для циантранилипрола, низкий – для паклобутразола и метрибузина.

При оценке риска для водных организмов используют следующие критерии: для **острой токсичности** $LC_{50}(EC_{50})/C_{вод} > 100$ – низкий риск, $100 > LC_{50}(EC_{50})/C_{вод} > 10$ – средний риск, $LC_{50}(EC_{50})/C_{вод} < 10$ – высокий риск; для **хронической токсичности** $NOEC/C_{вод} > 10$ – низкий риск, $10 > NOEC/C_{вод} > 5$ – средний риск, $NOEC/C_{вод} < 5$ – высокий риск (Горбатов, Кононова, 2011). Таким образом, по максимальной концентрации в лизиметрическом эксперименте риск циантранилипрола для дафний определен, как высокий, паклобутразола и метрибузина для высших растений как умеренный; при оценке по 80% персентилю концентраций – для всех организмов риск низкий.

При оценке риска с помощью модели PEARL использовали в качестве входных параметров среднее значение DT_{50} и минимальное значение K_{oc} из базы PPDB, тем самым моделируя сценарий наихудшего случая. Концентрации, и, следовательно, оценка риска применения по результатам моделирования и лизиметрического эксперимента (максимальные значения) были близки для циантранилипрола и метрибузина. Для паклобутразола прогнозные концентрации оказались значительно выше. При расчете по средним данным K_{oc} для паклобутразола получено значение 2,6 мкг/л, что ближе к экспериментальному значению.

При оценке воздействия применения пестицидов на окружающую среду также определяют опасность. Под экологической опасностью пестицида следует понимать его способность загрязнять окружающую среду и наносить вред нецелевым организмам дикой природы. Мерой экологической опасности пестицидов служат классы различного рода классификаций, например, индексов подвижности действующих веществ пестицидов K_{oc} и



GUS. Оценка по этим показателям практически совпала с оценкой по максимальным концентрациям в эксперименте (таблица 1).

Выводы

Лизиметрические эксперименты являются наглядным инструментом для оценки миграционного риска пестицидов. Однако процедура оценки риска пестицидов для грунтовых вод и водных организмов нуждается в разработке. Спорными являются вопросы по концентрации, используемой при оценке риска (максимальной, средней или соответствующей 80% перцентиллю), а также нуждаются в пересмотре критерии приемлемого риска.

Литература

- Постановление Правительства РФ от 6 марта 1998 г. N 292 "О Концепции федеральной целевой программы "Обеспечение населения России питьевой водой" и осуществлении первоочередных мероприятий по улучшению водоснабжения населения" (1998) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL <http://ivo.garant.ru/#/document/2156209/paragraph/481:0> (дата обращения 15.04.2019).
- Jorgensen L.F., Kjar J., Olsen P., Rosenbom A.E. (2012) Leaching of azoxystrobin and its degradation product R234886 from Danish agricultural field sites. *Chemosphere*, **88**, 554–562.
- THE PPDB - Pesticide Properties Database [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/index.htm> (дата обращения 15.04.2019)
- Колупаева В.Н. (2015) Моделирование миграции пестицидов в грунтовые воды с помощью модели PEARL и стандартных сценариев регионов России. *Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы исследования окружающей среды», посвященной 150-летию со дня рождения Г.Н. Высоцкого* 161-166.
- Горбатов В.С., Колупаева В.Н., Филенко О.Ф. и др. (2010) Методы оценки экологической опасности пестицидов при их регистрации (руководство по классификациям экологической опасности пестицидов). Б. Вяземы 17 с.
- Gustafson D. (1989) Hazards assessment; Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental toxicology and chemistry*. **8**. 339-357.
- Определение остаточных количеств циантранилипрола в воде, почве, капусте, плодах томата и томатном соке, в луке пере и луке репке методом высокоэффективной жидкостной хроматографии: Методические указания. —М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. — 32 с.
- Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей среды: Сборник.—М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011.— 179 с.
- Определение остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и объектах окружающей среды (2006) *Сборник методических указаний*.—М.: *Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора*, **3, 5**, 40 с.
- Швыряев А.А., Меньшиков В.В. (2004) Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: *Учебное пособие для вузов*. – М.: *Изд-во МГУ*, 124 с.
- Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration (2006). *Official Journal of the European Union*, **372**, 19-31.
- Колупаева В.Н. (2017) Формирование перечня пестицидов для их мониторинга в грунтовых водах. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. **XXIX**, **3**, 109-122.
- Горбатов В.С., Кононова Т.В. (2011) Структура экологических данных о пестицидах. *Нива Поволжья*, **1(18)**, 17-20.



УДК 632.42:631.43

КОНЦЕПЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОЧВЫ

Моисеев К.Г.^{1,*}, Терлеев В.В.²

¹ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

*Kir_moiseev@mail.ru

A CONCEPT FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FRACTAL DIMENSION OF THE SOIL
PORE SPACE

Moiseev K.G.¹, Terleev V.V.²

¹Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Annotation: The value of the fractal dimension of the soil structure is calculated by the geometric method on the basis of particle size distributions. There is a hope to express soil-hydrophysical functions through the fractal dimension of the soil pore space found in some more direct, simple and physically independent way.

Введение

Перспектива теоретического расчета функций водоудерживания (water retention function) и влагопроводности (hydraulic conductivity) почвы появилась с развитием фрактальной геометрии порового пространства почвы и теории перколяции. Отправная точка данных исследований работы середины 80-х и начала 90-х годов прошлого века Ромм Е.С. (1985); Tyler and Wheatcraft (1990); Rieu, M. & Sposito, G. (1991); Perfect, E., et al. (1992); Perrier et al. (1996). Фрактальные модели почвенной структуры появились на основе обобщения классических фракталов ковра Серпинского, губки Менгера (Tyler, Wheatcraft, 1990; Гончаров и др., 2007). Фрактальные модели, концептуально разделяют объем почвы на твердую и поровую фазы (Ganbarian-Alivijeh et al., 2011). Они работают с дискретными протяженностями. Причем, масштаб рабочей длины итеративно уменьшается, поскольку модель «строится» с использованием степенной функции для масштабирования. Так как при итерации размер пор уменьшается, то одновременно почва формально иссушается, а изменение итерационного масштаба при определении ветви иссушения кривой водоудерживания почвы аналогично процессу выхода воды из пор все более мелкого размера. Используют два типа теоретических моделей: в одних применяют массовый, в других - поровый фрактальный подход (Ganbarian-Alivijeh et al., 2010, 2011). В первом случае принимается, что все твердые тела имеют одинаковый размер, для масштабирования твердой фазы и порового пространства применяется фрактальный размер массы (D_m). Во втором случае одинаковый размер имеют поры, размер которых применяется для масштабирования (фрактальная размерность объема D_v).

Уязвимым местом фрактальных моделей остается оценка фрактальной размерности почвенной структуры. Для конкретных фрактальных моделей водоудерживания почвы разработаны конкретные расчетные процедуры массовой D_m и объемной D_v фрактальных размерностей капиллярно-пористой среды. Массовая фрактальная размерность почвы может



быть рассчитана из соотношения (Rieu, Sposito, 1991; Perfect, 1999): $P = 1 - \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right)^{3-D_m}$ (здесь

P - общая пористость почвы, r_{\max} и r_{\min} - максимальный и минимальный размеры почвенных пор) или из соотношения: $P = 1 - \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{3-D_m}$ (здесь $\left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{3-D_m} = V_{\text{тв.ф.}}$ - объем твердой фазы почвы).

Аналогично рассчитывается фрактальная размерность объема пор (Tyler, Wheatcraft, 1990):

$$D_v = \frac{\log P}{\log b^i} + E \quad (\text{здесь } - \text{ размер евклидова пространства, } E=2;3).$$

Если поровое пространство почвы моделируется ансамблем цилиндрических пор, масштабный коэффициент $b = (r \cdot \sqrt{\pi})^{-1}$ (здесь r - радиус капилляра). Вопрос определения граничных условий, то есть нахождения максимального и минимального радиуса пор капиллярно-пористой среды при определенном ее сложении, остается открытым. В предположении, что отношение максимального и минимального радиуса частиц R_{\min}/R_{\max} равно отношению максимального и минимального радиуса пор R_{\min}/R_{\max} Hunt и Gee (2002) рассчитали фрактальную размерность порового пространства D_v по трем параметрам:

$$D_v = 3 - \frac{\log(1 - P)}{\log(R_{\min}/R_{\max})}.$$

Модель PSF (Perrier et al., 1999, Bird et al., 2000) предоставляет прямой метод для оценки фрактальной размерности границы поры и твердого тела по измеренному распределению элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) по размерам; (Ghanbarian et al., 2015):

$$\frac{M(R < R_i)}{M_t} = \alpha^{D-E} \left(\frac{R_i}{L} \right)^{E-D_f} \quad R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max}, \quad (1)$$

где $\alpha < 1$ - итерационный фактор; L - индикатор размера ($\alpha R_{\max} = L$); M_t - общая масса фрагментов; E - Евклидова размерность, равная 3; D_f - фрактальная размерность при неполной фрагментации (наличие агрегатов в почве); R_{\max} и R_{\min} - максимальный и минимальный размеры фрагментов. В случае полной фрагментации почвы (или для агрегата, состоящего из ЭПЧ) выражение 1 преобразуется к известному выражению 2:

$$\frac{M(< R_i)}{M_t} = \left(\frac{\bar{R}}{R_{\max}} \right)^{3-D}. \quad (2)$$

Пористость (объем пор) P : $P = 1 - \left(\frac{\bar{R}}{R_{\max}} \right)^{3-D}$ (здесь \bar{R} - средний размер ЭПЧ).

Масса воды практически равна ее объему и, поэтому объемная и массовая фрактальные размерности структуры почвы при моделировании ее водоудерживания равны с определенной степенью точности. Для практического расчета фрактальных размерностей почвы необходимо располагать данными распределения ЭПЧ по размерам, то есть - провести гранулометрический и агрегатный анализы, определить плотность сложения и плотность твердой фазы почвы и вычислить пористость. Расчетные методы имеют погрешность вычисления фрактальной размерности, что приводит к ошибкам моделирования водоудерживания почвы. Всегда существовала и существует надежда исследователей выразить почвенно-гидрофизические функции через фрактальную размерность порового пространства почвы, найденную каким-то более прямым, простым, и физически независимым



способом. Предложить к обсуждению теоретическую концепцию «независимого» метода определения фрактальной размерности является задачей этой работы.

Объекты и методы

Поскольку распределение пор по размерам и объему почвы случайно (Терлеев и др., 2012) и поры часто не формируют единое поровое пространство, постольку и осушение или заполнение пор водой - случайные процессы. Поэтому поиск решения поставленной задачи следует искать в теории случайных процессов. Осушение и увлажнение почв происходят импульсно (Моисеев, Терлеев, 2017). Согласно теории перколяции среда «внезапно» обретает свойства влагопроводности при заполнении всех своих пор и пустот жидкостью. Поток влаги через пористую среду по уравнению Пуазейля пропорционален четвертой степени радиуса пор, отнесенному к длине пор (или извилистости пути потока). Поэтому при незначительном изменении размеров пор происходит существенное изменение величины объемного расхода (Q) при постоянном напоре. При вхождении в такую пору небольшого добавочного количества воды происходит выброс всей накопленной в порах воды, т. е. объемный расход превышает текущее поступление воды в почву. Возникает так называемый эффект Харста, то есть - поступление воды в почву вызывает выход большего объема воды из почвы, чем поступило. В английском языке существует специальный термин «фликкер-процесс» (от англ. flicker – вспышка) для обозначения процессов, протекающих как импульс – короткая вспышка с последующим затуханием частоты периодической функции процесса во времени. Подобный процесс может быть единым и состоять из серии «вспышек». Стандартное отклонение такого случайного процесса (при нулевом среднем) определяется как $T^{0,5}$ (где T период), дисперсия величин X_i , соответственно, должна быть равна всему периоду времени $S_{X_i} = T$. Автокорреляционная функция его приращений - функция Дирака, что означает отсутствие корреляций в последовательных значениях приращений величины X_i и постоянство спектра на всех частотах ($f(\nu) = const$, ν - частота).

В ряде гидрологических процессов в природе эта пропорциональность нарушается. Дисперсия равна $S_{X_i} = T^H$, $0 < H < 1$, а отклонение H величины степени получило название показателя Харста: по имени британского климатолога и гидролога, впервые рассчитавшего этот эффект для паводковой ситуации на р. Нил (Найдёнов, Кожевникова, 2000).

Результаты и обсуждение

В лабораторных исследованиях фильтрации влаги через монолит почвы естественного сложения определена величина объемного расхода влаги. По результатам испытаний оказалось, что суммарный расход влаги Q не пропорционален \sqrt{T} , а показатель степени T не равен 0,5. Выявлена закономерность, известная как эффект Харста. Характерный сигнал фликкер-процесса для почвы в условиях неустановившейся фильтрации влаги через образец естественного сложения показан на рис. 1.

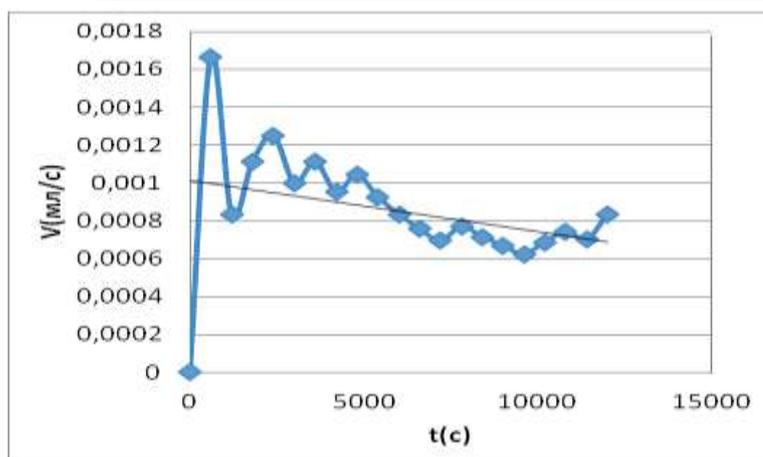


Рис. 1. Фликкер-процесс при фильтрации влаги через образец почвы не нарушенного сложения

На основании рис. 1 правомерна постановка задачи об определении спектра такого случайного процесса, как объемный расход воды $Q(T)$ в условиях нестационарной фильтрации влаги через почву. По данным фильтрационных испытаний образца почвы ненарушенного сложения можно утверждать: если спектр процесса $f(v) \rightarrow \infty$, то почва имеет фрактальную структуру. Фрактальную размерность такого сигнала легко определить методом линейных систем фрактальной геометрии (Моисеев и др., 2014). Таким образом, в силу эффекта Харста обусловленного участием в процессе нестационарной фильтрации всего объема пор почвы (включая и тупиковые поры), а не только пор инфильтрации, получаем возможность определения фрактальной размерности почвенной структуры. Зависимость объемного расхода от времени при фильтрации влаги через почву - это временной ряд общего вида $L^n = f(T)$. Итерируем полученный ряд с суммарной длиной L и определяем фрактальный декремент δ как степень показательной функции $\log L = f(\log m^i)$, m^i - итерационный масштаб длины ряда (Старченко, 2005; Моисеев и др. 2014). Фрактальная размерность почвенной структуры находится из соотношения $D = 2 + |\delta|$. В случае отсутствия спектра $f(v) = const$ полученная экспериментальная зависимость объемного расхода от времени при фильтрации влаги имеет гладкий характер: это - случай регулярной структуры почв и неразрывного порового пространства. В данном случае отсутствует режим фрактального влагопереноса. А структуру почв следует описывать регулярными моделями.

Выводы

Экспериментально-расчетный метод определения фрактальной размерности порового пространства почвы при фильтрации влаги через почвенный монолит ненарушенного сложения освобождает нас от целого ряда вопросов. Во-первых, решается проблема диагностики типа почвенной структуры и режима влагопереноса в почве. При $f(v) = const$ следует использовать упорядоченные модели для моделирования структуры почвы; влагоперенос в почве не имеет фрактального характера. В ином случае, структура почвы моделируется методами фрактальной геометрии. Во-вторых, исследуется почва ненарушенного сложения; применяется не разрушающий структуру почв метод, что повышает точность определения фрактальной размерности. В-третьих, такой подход избавляет от необходимости учитывать вероятность фрагментации почвы и вероятность



осушения или увлажнения отдельных областей дискретного порового пространства при влагопереносе, то есть - рассчитывать «частичную» фрактальную размерность данных областей. Из данных фильтрационного опыта можно непосредственно вычислить значение мультифрактальной размерности порового пространства и использовать это значение при дальнейшем моделировании функций водоудерживания и влагопроводности почвы при помощи фрактальных моделей.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-04-00939-а.

Литература

- Гончаров В.Д., Ильинова В.Ю. (2007) Модель пористости на основе обобщенной губки Менгера. *Физические, химические и климатические факторы продуктивности полей*. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 44-47.
- Моисеев К.Г., Бойцова Л.В., Гончаров В.Д. (2014) Анализ динамики гумусового состояния почв фрактальными методами. *Агрофизика* **1(13)**, 1-8.
- Моисеев К.Г., Терлеев В.В. (2017). Моделирование структуры капиллярно-пористой среды и вычисление дифференциальной пористости почв. *Агрофизика* **3**, 43-56.
- Найдёнов В.И., Кожевникова И.А. (2000). Эффект Харста в Геофизике. *Природа* **1**, 3-11.
- Старченко Н.В. (2005) Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов. *Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ*, 74.
- Терлеев В.В., Mirschel W., Баденко В.Л., Гусева И.Ю., Гурин П.Д. (2012) Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы. *Агрофизика* **4(8)**, 1-8.
- Bird N., Perrier E., Rieu M. (2000) The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science* **51**, 55–60
- Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Huang G.H., Van Genuchten M.T. (2010) Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere* **20**, 456-465.
- Ghanbarian-Alavijeh B., Millan H., Huang G. 2011. A review of fractal, prefractal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve. *Can. J. Soil Sci.* **91**, 1-14.
- Ghanbarian-Alavijeh B., Hunt A.G., Skinner T.E., Ewing R.P. (2015). Saturation dependence of transport in porous media predicted by percolation and effective medium theories. *[Электронный ресурс]//ResearchGate 2016*.
- Hunt A.G, Gee G.W. (2002) Water-retention of fractal soil models using continuum percolation theory: Tests of Hanford Site soils. *Vadose Zone J.* **1**, 252-260
- Perfect E. (1999) Estimating mass fractal dimensions from water retention curves. *Geoderma* **88**, 221-231.
- Perrier E., Bird N., Rieu M. (1999) Generalizing the fractal model of soil structure: The pore–solid fractal approach. *Geoderma* **88**, 137-164.
- Rieu M, Sposito G. (1991) Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory, II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**, 1231-1244.
- Tyler S.W., Wheatcraft S.W. (1990). Fractal processes in soil water retention. *Water Resour. Res.* **26(5)**, 1047-1054.



УДК 57.033

ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ БИОУГЛЯ

Мухина И.М.¹, Рижия Е.Я.¹, Бучкина Н.П.¹, Балашов Е.В.¹

¹ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Российская Федерация
Muhinairina1989@gmail.com

CHANGES IN SOIL CONDITIONS AFTER APPLICATION OF BIOCHAR

Mukhina I.M.¹, Rizhiya E.Y.¹, Buchkina N.P.¹, Balashov E.V.¹
Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, Russia

Annotation: Application of wooden biochar to loamy sand Spodosol enhanced soil water-holding capacity in easily-drained pores by an average of 7%, increased soil moisture by 1.13-1.19 times, reduced the density of soil composition by 1.05 times and led to a short-term increase in soil pH.

Биоуголь представляет собой карбонизированный устойчивый продукт, получаемый при пиролизе органических отходов и используемый в качестве почвенного мелиоранта. Благодаря своей структуре, химическому составу и свойствам биоуголь может изменять свойства почв в длительной перспективе. Для изучения влияния древесного биоугля на дерново-подзолистую супесчаную почву был проведен вегетационно-полевой эксперимент. В качестве вариантов были выбраны почва-контроль, почва с биоуглем в дозе 5 т га⁻¹, почва с азотным удобрением в дозе 90 N га⁻¹ и почва с биоуглем и азотом. Внесение биоугля привело к повышению водоудерживающей способности почвы в легкодренируемых влагопроводящих порах в среднем на 7 %, повысило влажность почвы в 1,13-1,19 раза, снизило плотность сложения почвы в 1,05 раза и привело к кратковременному повышению рН почвы.

Введение

Биоуголь – продукт пиролиза отходов сельского и лесного хозяйства при повышенной температуре 300-900 °С в бескислородной среде. Главная характеристика биоугля – высокое содержание устойчивого к распаду углерода (Sohi с соавт., 2010). Его применение в качестве почвенного мелиоранта способно решить две задачи – секвестрация углерода в почве на длительный срок и улучшение почвенных характеристик (Chan с соавт., 2007). Благодаря своей пористой структуре биоуголь может менять физические свойства почвы – влажность, плотность сложения, водоудерживающую способность, размер и расположение пор в почве и т.д. (Major с соавт., 2009).

Объекты и методы

Мелкоделяночный полевой эксперимент проводился на агродерново-подзолистой супесчаной почве, на Агрофизическом стационаре Меньковского филиала ФГБНУ АФИ (Гатчинский район, Ленинградской обл.) в течение вегетационного сезона (май-сентябрь). Исследуемый биоуголь был произведен путем быстрого пиролиза при температуре 550 °С из остатков древесины деревьев (ольха, береза, осина). Уголь характеризовался высоким содержанием углерода (78,6 %), и меньшим содержанием водорода (5, 2 %) и азота (0,3 %), нейтральной реакцией (рН = 7,0) и высокой пористостью (81 %). Выращиваемая культура – картофель сорта Ломоносовский (*Solanum Tuberosum* L.)



В эксперименте были изучены следующие варианты: почва-контроль (К), почва с биоуглем (Б, из расчета 5 т га^{-1}), почва с азотным удобрением (N, азофоска из расчета 90 кг N га^{-1}), почва с биоуглем и удобрением (Б+N). Повторность опыта – 4х- кратная.

Отбор почвенных образцов для анализа влажности, температуры, плотности сложения, водоудерживающей способности и pH проводился каждые 14 дней. Анализы проводились по стандартным методикам. Для характеристики влагоудерживающей способности почвы определяли потенциал почвенной влаги методом мембранных прессов Ричардса (Растворова, 1983). По зависимости давления от содержания почвенной влаги были построены кривые ОГХ (основная гидрофизическая характеристика).

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета программ Statistics 5.0.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования потенциала почвенной влаги от -5 до -1500 кПа представлены в виде кривых ОГХ (рис. 1).

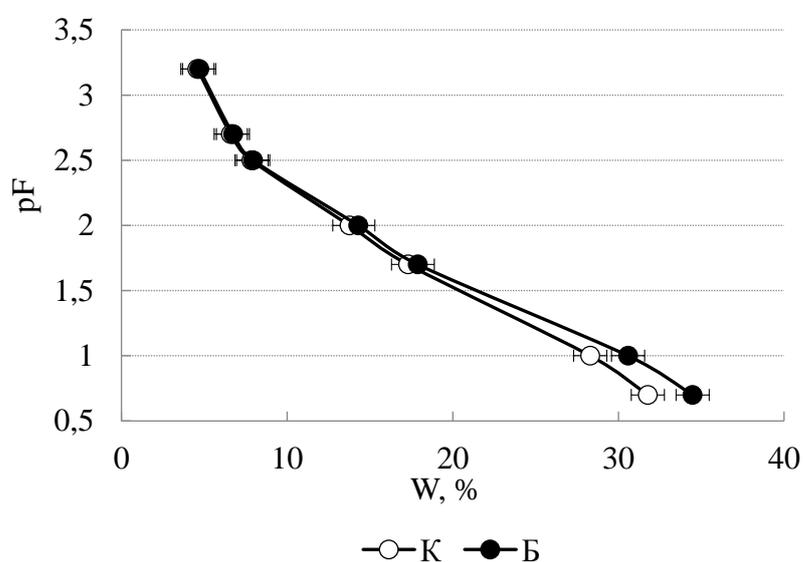


Рис.1 – Основная гидрофизическая характеристика исходной дерново-подзолистой супесчаной почвы без биоугля и с биоуглем

Примечание – К – дерново-подзолистая супесчаная почва, Б – почва с биоуглем, pF – десятичный логарифм от давления.

Значимые ($p < 0,05$) изменения в потенциале почвенной влаги при внесении биоугля отмечались при давлении выше -10 кПа ($pF=1$). Влажность в данном диапазоне была в среднем в 1.07 раза выше в варианте с биоуглем, чем в контроле. Данному потенциалу соответствует гравитационная влага грунтового потока, проходящая по легкодренируемым и влагопроводящим порам в почве, обеспечивающая растения влагой и питательными веществами. При более низком давлении разница в содержании влаги в данных вариантах была незначительна ($p > 0,05$).

Влажность почвы – один из факторов, оказывающих большое влияние на рост растений и использование ими питательных элементов. В ходе вегетационного сезона образцы почвы анализировались на содержание влаги в вариантах опыта. Динамика влажности в ходе эксперимента представлена на рисунке 2.



Влажность почвы зависела от погодных условий в течение вегетационного сезона – температуры воздуха и количества осадков. Максимальное содержание влаги наблюдалось в вариантах с биоуглем. Его внесение повысило влажность почвы в среднем в 1.13-1.19 раза по сравнению с вариантами почвы-контроль и почвы с азотным удобрением.

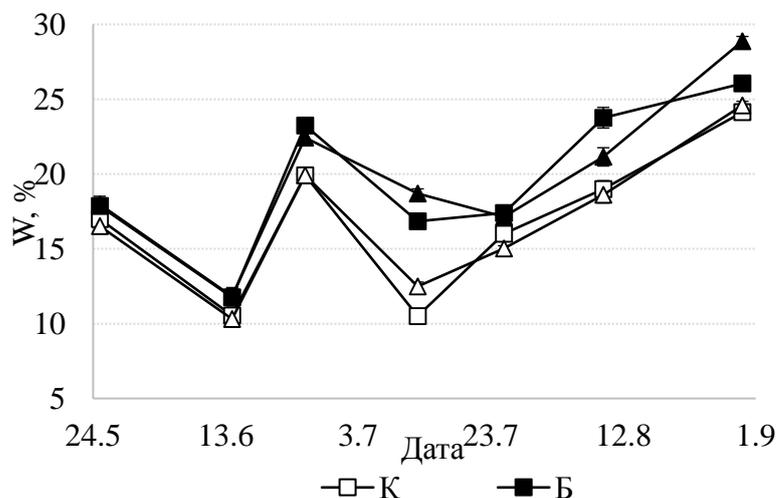


Рис. 2. Динамика влажности в дерново-подзолистой супесчаной почве в вегетационный период.

Примечание – К –дерново-подзолистая супесчаная почва, Б – почва с биоуглем, N90 – почва с азотным удобрением, Б+N90 – почва с биоуглем и удобрением.

Внесение азотного удобрения не привело к значительному ($p > 0,05$) изменению влажности почвы по сравнению с контрольным вариантом.

В своих исследованиях Р. Гондим (2018) и К. Камманн (2011) с соавторами показали, что биоуголь, являясь пористым продуктом, может поглощать влагу и удерживать ее в порах, тем самым повышая водоудерживающую способность и влажность почвы, снижая потери почвенной влаги.

Плотность почвы менялась в течение вегетационного сезона. Ее динамика представлена на рисунке 3.

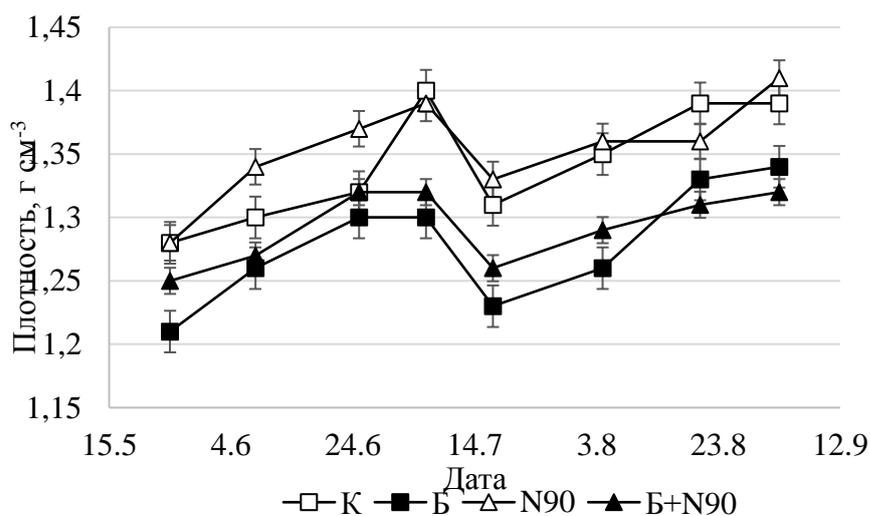


Рисунок 3. Динамика плотности дерново-подзолистой супесчаной почвы в течение вегетационного сезона. Примечание – К –дерново-подзолистая супесчаная почва, Б – почва с биоуглем, N90 – почва с азотным удобрением, Б+N90 – почва с биоуглем и удобрением.



Плотность почвы менялась в течение вегетационного сезона. Максимальные значения отмечались в вариантах почвы-контроль и почвы с азотным удобрением. Внесение биоугля привело к значительному снижению ($p < 0,05$) плотности почвы, по сравнению с вариантами К и N90. Разница между вариантами с биоуглем и без биоугля в среднем составляла 1,05 раза. Структура биоугля, характеризующаяся высокой пористостью может оказывать воздействие на плотность почвы.

Микробиологические процессы в почве, погодные условия и внесение почвенных мелиорантов оказывают влияние на реакцию почвенной среды. Динамика реакции почвенной среды в течение вегетационного сезона представлена на рисунке 4.

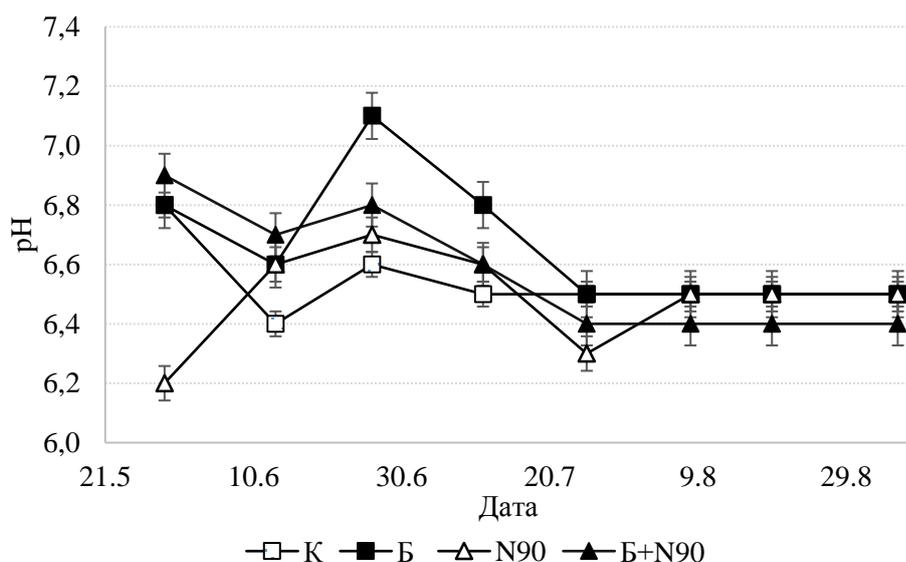


Рис. 4. Динамика рН в дерново-подзолистой супесчаной почве в течение вегетационного сезона.

Примечание – К –дерново-подзолистая супесчаная почва, Б – почва с биоуглем, N90 – почва с азотным удобрением, Б+N90 – почва с биоуглем и удобрением.

Дерново-подзолистая супесчаная почва характеризовалась слабо-кислой реакцией среды. В течение сезона она варьировала от 6,4 до 6,8. Внесение биоугля в почву привело к значительному ($p > 0,05$) повышению рН в первые 7 недель эксперимента с его максимумом, равным 7,1, на 5-ю неделю эксперимента. Далее в варианте почвы с биоуглем отмечалось снижение рН до минимального значения 6,5, близкого к контрольному варианту. Биоуголь способен изменять рН почвы за счет растворимых функциональных групп, которые могут взаимодействовать с почвенной средой.

В варианте почвы с азотным удобрением отмечалось существенное ($p < 0,05$) снижение рН в начале эксперимента, по сравнению с контрольным вариантом, до минимального значения 6,2. Далее до 5-й недели рН возрастал и значительно ($p < 0,05$) превышал значение в контрольном варианте. После пятой недели отмечалось снижение кислотности среды в почве с удобрением и к концу эксперимента рН был равен значению в контрольном варианте. В варианте почвы с биоуглем и азотным удобрением рН в первые 5 недель эксперимента было значительно ($p < 0,05$) выше, чем в контрольном варианте. Далее наблюдалось существенное



снижение и к концу эксперимента рН в варианте Б+N90 был несущественно ниже, чем в контрольном варианте.

Выводы

1. Биоуголь повысил содержание влаги в дерново-подзолистой супесчаной почве в среднем в 1,13-1,19 раза.
2. Биоуголь способствовал улучшению водоудерживающей способности дерново-подзолистой супесчаной почвы в легкодренируемых влагопроводящих порах в среднем на 7 %.
3. Биоуголь снижал плотность почвы в среднем в 1,05 раза.
4. Биоуголь повышал рН дерново-подзолистой супесчаной почвы в первые 7 недель после внесения в почву.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-016-00038.

Литература

- Растворова О.Г. (1983) Физика почв: Практическое руководство. Л.: Изд-во ЛГУ, 193 с.
- Chan K.Y., Van Zwieten I., Mesaros A. (2007) Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Researches* **45** (8), 629-634.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.852.961&rep=rep1&type=pdf>
- Devereux R.C., Sturrock C.J., Mooney S.J. (2012). The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* **103**, 13-18.
https://www.researchgate.net/publication/255728367_The_effects_of_biochar_on_soil_physical_properties_and_winter_wheat_growth.
- Gondim R.S., Muniz C.R., Pacheco Lima C.E. (2018) Explaining the water-holding capacity of biochar by scanning electron microscope images. *Rev. Caatinga* 31 (4), 972-979.
<http://www.scielo.br/pdf/rcaat/v31n4/1983-2125-rcaat-31-04-972.pdf>.
- Kammann C. I., Linsel S., Gobling J.W., Kpyro H.-W. (2011). Influence of biochar drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations. *Plant and Soil* **345** (1), 195-210.
https://www.researchgate.net/publication/226609011_Influence_of_biochar_on_drought_tolerance_of_Chenopodium_quinoa_Willd_and_on_soil-plant_relations
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E. (2010) A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* **105**, 47-82.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211310050029>



УДК 519.63

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕНОСА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ "ПОЧВА - РАСТИТЕЛЬНОСТЬ - АТМОСФЕРА"

Ольчев А.В.¹, Мухартова Ю.В.², Дьяченко М.С.², Мангура П.А.², Мамкин В.В.³, Курбатова Ю.А.³

¹ Географический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация
aoltche@yandex.ru

² Физический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Российская Федерация
muhartova@yandex.ru

³ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, Москва, Российская Федерация
kurbatova.j@gmail.com

APPLICATION OF A THREE-DIMENSIONAL MODEL TO DERIVE THE CARBON DIOXIDE EXCHANGE IN THE "SOIL - VEGETATION - ATMOSPHERE" SYSTEM

Olchev A.V.¹, Mukhartova Yu.V.², Dyachenko M.S.², Mangura P.A.², Mamkin V.V.³, Kurbatova J.A.³

¹ Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Russia

² Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

³ A.N.Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russia

Annotation: A three-dimensional model was applied to derive the spatial pattern of CO₂ fluxes within and around a recently clear-cut area. Results showed a strong influence of vegetation heterogeneity on CO₂ air flow patterns. The rates of horizontal CO₂ exchange at the soil surface layer are comparable with vertical CO₂ fluxes.

Введение

Исследования потоков парниковых газов в системе "почва - растительность - атмосфера" в настоящее время проводятся с использованием широкого спектра экспериментальных подходов, включая пульсационные (eddy covariance), балансовые и камерные методы наблюдений (Инсаров и др., 2012; Ольчев и др., 2017). Большинство измерительных методик для измерений потоков в масштабе экосистемы предполагают наличие горизонтальной однородности подстилающей поверхности. В случае сильной изреженности рельефа, неоднородного растительного и почвенного покрова определение потоков существующими методиками сопряжено с большими погрешностями. Эффективным инструментом для решения подобного класса задач служат процесс-ориентированные двух- и трехмерные модели переноса парниковых газов между почвой, растительностью и приземным слоем воздуха (Sogachev, Panferov, 2006; Мухартова и др., 2015; Ольчев и др., 2017).

Основной целью данного исследования является развитие трехмерной (3D) гидродинамической модели переноса парниковых газов и ее применение для описания переноса диоксида углерода (CO₂) между неоднородным растительным покровом и атмосферой. В качестве модельного объекта в исследовании выбрана сплошная вырубка, окруженная спелым еловым древостоем.

Объекты и методы

Объект исследования

Исследуемая вырубка имеет площадь около 4.5 га (Рис. 1) и расположена в зоне рационального природопользования Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, ЦЛГПБЗ (Тверская область, Нелидовский район, 56°26' с.ш., 33°03' в.д.) (Рис. 1). Исследуемая территория относится к атлантико-континентальной



европейской области умеренного пояса с умеренно-теплым летом и длительной холодной зимой с устойчивым снежным покровом. Сплошная рубка леса на исследуемом участке была произведена в марте-апреле 2016 г. После расчистки участка и вывоза древесины на вырубке оставалось большое количество пней, древесного опада и порубочных остатков. Вырубка окружена еловым древостоем с участием берёзы и осины. Высота древостоя около 20 м, листовой индекс (LAI) около $4 \text{ м}^2\text{м}^{-2}$. Почвы на исследуемом участке - дерново-слабоподзолистые. Запас органического углерода в верхнем 10-сантиметровом слое почвы на вырубке варьирует от 2.7 до 5.8 %.



Рис.1. Географическое положение района исследований и фото исследуемой сплошной вырубki

Трехмерная модель переноса диоксида углерода

Применяемая в исследовании 3D гидродинамическая модель основана на решении системы усредненных уравнений неразрывности и Навье-Стокса для компонент скорости ветра и уравнения реакции-диффузии-адвекции для переноса CO_2 с использованием полуторного порядка замыкания в пределах приземного слоя атмосферы (Sogachev, Panferov, 2006; Mukhartova et al., 2017; Olchev et al. 2017). Компоненты скорости ветра, $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$, $\vec{V} = \{u, v, w\}$, и концентрация CO_2 , $c = c(x, y, z, t)$, являются функциями горизонтальных координат x , y , и вертикальной координаты z , где ось y направлена вдоль преобладающего направления ветра, а z представляет собой высоту над поверхностью. В модели используется разложение Рейнольдса для компонент скорости ветра и концентрации CO_2 , которые представляются в виде сумм их средних значений и случайных составляющих: $\vec{V} = \bar{\vec{V}} + \vec{V}'$ и $c = \bar{c} + c'$, где $\bar{\vec{V}} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}$ и \bar{c} – средние значения, $\vec{V}' = \{u', v', w'\}$ и c' – флуктуации. В случае нейтральной атмосферной стратификации усредненное уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{\vec{V}}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla \delta P - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u' \vec{V}'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v' \vec{V}'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w' \vec{V}'} \right) + \vec{F}^{cor} + \vec{F}^d, \quad \text{div} \bar{\vec{V}} = 0,$$

где ρ_0 – плотность сухого воздуха, δP – усредненное отклонение давления от гидростатического распределения, \vec{F}^{cor} и \vec{F}^d – сила Кориолиса и сила трения, возникающая при взаимодействии воздушного потока с растительностью. Сила трения в растительном покрове имеет вид $\vec{F}^d = -c_d \cdot LAD \left| \bar{\vec{V}} \right| \cdot \bar{\vec{V}}$, где c_d – безразмерный коэффициент трения (в данной работе он был взят равным $c_d = 0.4$), LAD – плотность фитомассы (leaf area density,



$\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-3}$), описывающая площадь элементов растительности (листья, ветки, стволы) в единичном объеме.

Для замыкания системы уравнений в модели делается предположение, что турбулентные потоки могут быть выражены через турбулентную кинетическую энергию E ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$) и коэффициент турбулентного обмена K ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$):

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) E = \text{div} \left(\frac{K}{\sigma_E} \nabla E \right) + P_E - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \varphi = \text{div} \left(\frac{K}{\sigma_\varphi} \nabla \varphi \right) + \frac{\varphi}{E} (C_{\varphi 1} \cdot P_E - C_{\varphi 2} \cdot \varepsilon) + \Delta_\varphi,$$

где φ ($\varphi = \varepsilon \cdot E^{-1}$) является вспомогательной функцией, характеризующей масштаб турбулентности. Безразмерные константы $\sigma_E = \sigma_\varphi = 2$ представляют собой число Прандтля для E и турбулентное число Шмидта для функции φ , соответственно. Коэффициенты $C_{\varphi 1} = 0.52$ и $C_{\varphi 2} = 0.8$ – модельные константы. Слагаемое Δ_φ описывает увеличение диссипации E в результате взаимодействия с растительностью и в первом приближении может быть выражено как

$$\Delta_\varphi = 12 \cdot \sqrt{C_\mu} \cdot (C_{\varphi 2} - C_{\varphi 1}) \cdot c_d \cdot LAD \cdot |\bar{\vec{V}}| \cdot \varphi.$$

Трехмерное распределение концентрации CO_2 получается из решения уравнения диффузии-реакции-адвекции:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{c} = \text{div}(K_C \nabla \bar{c}) + F_C,$$

где коэффициент турбулентного обмена K_C считается пропорциональным коэффициенту турбулентной диффузии K : $K_C = Sc^{-1}K$, где Sc – число Шмидта (в данной работе $Sc=0.75$). Слагаемое F_C описывает источники и стоки CO_2 в растительности.

Результаты и обсуждение

Расчеты полей скорости ветра с помощью трехмерной математической модели при южном направлении ветра, солнечной погоде и нейтральной атмосферной стратификации показали существенную деформацию воздушного потока как в пределах исследуемой вырубке, так и внутри окружающего вырубку древостоя. Вблизи подветренного края леса отмечаются горизонтальные течения разных направлений (Рис. 2). Также для этой части вырубке отмечаются сильные нисходящие движения воздуха, инициирующие реверсное движение воздуха в припочвенном слое и восходящие потоки в непосредственной близости от подветренной опушки леса. Именно на этот участок вырубке и прилегающий участок леса приходятся максимальные скорости вертикального переноса CO_2 между земной поверхностью и атмосферой. Данный поток формируется в значительной степени за счет горизонтального выноса выделяемого почвой и лесной подстилкой CO_2 с подветренной стороны лесного массива, окружающего вырубку (Рис. 3). Максимальные вертикальные потоки CO_2 в атмосферу также отмечаются и вблизи опушки леса в западной части вырубке. При этом по абсолютной величине они сопоставимы со скоростями горизонтального переноса. Их возникновение может быть связано с высокими скоростями горизонтального переноса CO_2 под пологом леса в северо-западной части прилегающего к вырубке леса (Рис. 2-3). Определенное влияние на возникновение очагов максимальных вертикальных потоков CO_2 может оказывать и сложная геометрия границы вырубке (Рис. 1). Как видно из рисунка 3 величина горизонтальной адвекции CO_2 под лесным пологом в северо-западной части лесного массива достигает $+10...+12$ мкмоль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, превосходя скорости вертикального



переноса CO_2 на этом участке. Прогнозируемые достаточно небольшие вертикальные потоки CO_2 под пологом леса на удалении от края вырубki обусловлены главным образом слабым вертикальным перемешиванием воздуха внутри сомкнутого лесного полога. В южной части вырубki потоки CO_2 по абсолютной величине на высоте 4 м также достигают максимальных значений $+12\dots+14$ $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$. При этом у края леса поток CO_2 за счет реверсных движений меняет направление, достигая $-8\dots-12$ $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (перенос CO_2 по направлению к земной поверхности). По абсолютным значениям вертикальные потоки CO_2 в этой части вырубki на высоте 4 м сопоставимы со скоростями горизонтального переноса CO_2 .

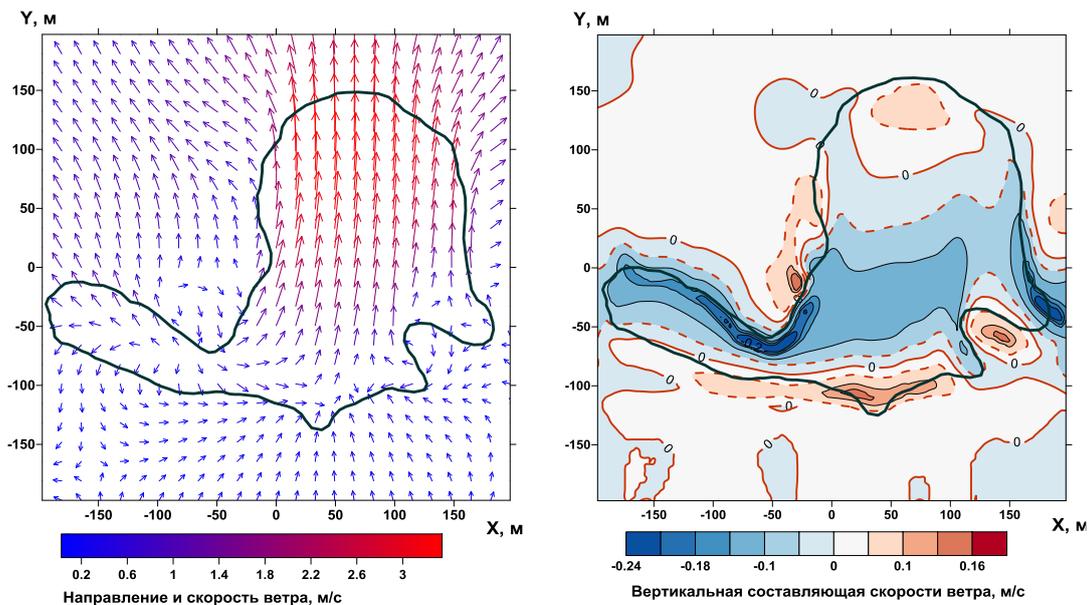


Рис.2. Линии тока и горизонтальное распределение вертикальной составляющей скорости ветра на вырубке и в окружающем древостое на высоте 4 м над земной поверхностью.

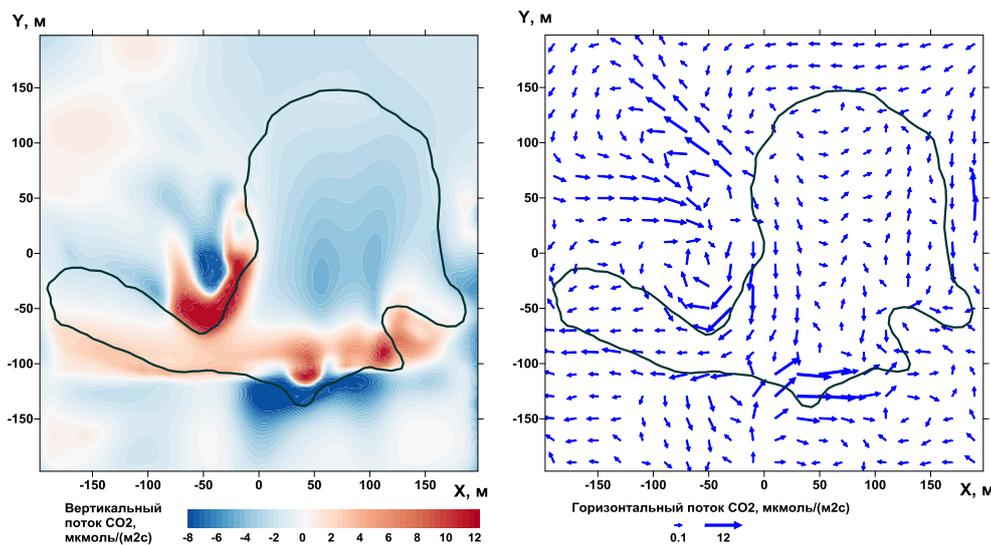


Рис.3. Вертикальные и горизонтальные потоки CO_2 на вырубке и в окружающем древостое на высоте 4 м над земной поверхностью. Сплошной линией обозначена граница вырубki.

Анализируя выявленную сложную структуру вертикального и горизонтального переноса CO_2 , обусловленного взаимодействием воздушного потока с неоднородной лесной



растительностью, можно говорить о важности продолжения исследований влияния пространственной неоднородности земной поверхности на потоки парниковых газов в системе "почва - растительность - атмосфера". Это необходимо как для решения задач, связанных с развитием подходов для перехода от точечных измерений к экосистемным оценкам потоков CO_2 , так и для анализа границ применимости прямых методов измерения потоков (особенно метода турбулентных пульсаций, eddy covariance).

Выводы

На основе результатов численных экспериментов, проведенных с помощью трехмерной математической модели переноса, для сплошной свежей вырубki было показано, что в ходе взаимодействия воздушного потока с горизонтально неоднородным растительным покровом происходит значительная деформация поля ветра как в пределах вырубki, так и в окружающем вырубку древостое. Это приводит к изменению режима турбулентности и потоков момента импульса, тепла и парниковых газов внутри растительности и в приземном слое атмосферы. Максимальные вертикальные и горизонтальные потоки CO_2 вблизи земной поверхности (на высоте 4 м) прогнозируются вблизи наветренных и подветренных участков опушки леса. При этом скорости горизонтальных CO_2 потоков на отдельных участках вырубki и окружающего древостоя существенно превышают скорости вертикальных потоков. Пренебрежение горизонтальным переносом в экспериментальных исследованиях может привести к существенным погрешностям в количественной оценке атмосферных потоков между неоднородной земной поверхностью и атмосферой.

Литература

- Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., и др. (2012) Природные экосистемы суши, Глава 6 / В: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. под ред. С.М. Семенова. Москва: НИЦ «Планета», 190-265
- Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. (2015) Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO_2 в пространственно-неоднородном растительном покрове. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия* **1**, 15-22
- Ольчев А.В., Авилов В.К., Байбар А.С., и др. (2017) Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. Москва: Товарищество научный изданий КМК, 276 с.
- Mukhartova Yu.V., Krupenko A.S., Mangura P.A., Levashova N.T. (2017). A two-dimensional hydrodynamic model of turbulent transfer of CO_2 and H_2O over a heterogeneous land surface. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **107**, 012103
- Olchev A.V., Mukhartova Yu.V., Levashova N.T., Volkova E.M., Ryzhova M.S., Mangura P.A. (2017). The Influence of the Spatial Heterogeneity of Vegetation Cover and Surface Topography on Vertical CO_2 Fluxes within the Atmospheric Surface Layer. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **53**(5), 539-549
- Sogachev A., Panferov O. (2006). Modification of two-equation models to account for plant drag. *Bound. Lay. Meteorol.* **121**(2), 229-266



УДК 631.4

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ АГРЕГАТОВ В УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ-ИССУШЕНИЯ

Романенко К.А. ^{1,2}

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
lusteramisho@mail.ru

²Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация

STRUCTURE ORGANIZATION OF SOIL AGGREGATES

Romanenko K.A. ^{1,2}

¹Lomonosov MSU

²Doduchaev Soil Science Institute

Аннотация: При многократном увлажнении и иссушении агрегатов суглинисты почв увеличивается их пористость, при этом структура твёрдой фазы фрагментируется. Структура агрегатов не возвращается в исходное состояние при иссушении, при этом агрегаты серой почвы изменяется сильнее, чем агрегат чернозёма.

Введение

Геометрическая организация порового пространства почв влияет на их функционирование как депо влаги и питательных элементов для растений и биоты, являясь пространством для роста и развития корней. Процессы увлажнения и иссушения отражаются в геометрической организации твердой фазы почв что важно для прогнозирования функционального состояния почв и подбора мероприятий для улучшения почвенных функций. Цель работы – количественное описание структурная организации агрегатов суглинистых почв в условиях циклического увлажнения и иссушения.

Объекты и методы

Объектами исследования были агрегаты фракции размером 7-10 мм гумусовых горизонтов чернозёма миграционно-мицеллярного и серой почвы.

Эксперимент по циклическому увлажнению и иссушению выполнен следующим образом: воздушно-сухой почвенный агрегат располагался в пластиковый цилиндр с фильтровальной бумагой на дне. На фильтровальную бумагу медленно с помощью шприца подавалась вода в количества 50% от массы агрегата. Таким образом агрегат капиллярно насыщался водой от фильтровальной бумаги. Далее цилиндр закрывался резиновой крышкой для предотвращения испарения воды в ходе томографической съёмки. Съёмка агрегатов осуществлялась в воздушно-сухом состоянии и увлажнённом, через 15 минут после окончания увлажнения, чтобы успели пройти процессы увеличения объёма, и образец стал неподвижным. Иссушение проводилось в открытом цилиндре в комнатных условиях в течение суток. В эксперименте было выполнено 5 циклов увлажнения-иссушения. Томографическая съёмка проводилась на рентгеновском микротомографе Bruker SkyScan 1172G при ускоряющем напряжении 70кВ с использованием 0,5мм Al фильтра с разрешением 7мкм.

Метод компьютерной микротомографии позволяет оценить изменение объёма набухающих образцов и их внутреннего строения. Так как метод является неразрушающим, есть возможность проводить циклические исследования образцов с регистрацией изменений на каждой стадии. Для оценки изменения структуры порового пространства агрегатов почв



использовались следующие показатели: пористость (томографическая, в пределах разрешения, %), распределение фрагментов твёрдой фазы по размеру (локальная толщина твёрдой фазы, мкм), распределение пустот по размеру (локальная толщина пор, мкм).

Результаты и обсуждение

Пористость агрегатов чернозёма за 5 циклов увлажнения-иссушения увеличивается, в среднем, от 9 до 12% в высушенном состоянии, во влажном – от 12 до 18%. Объём всего агрегата увеличивается на 3-5 %, а объём твёрдой фазы агрегата – на 1-3%.

Агрегаты серой почвы при первом увлажнении увеличивают пористость от 6 до 20%, объём агрегата увеличивается на 15-20%, а объём твёрдой фазы на 3-5%.

Изначальное распределение объёмов твёрдой фазы всех исследованных агрегатов по локальной толщине имеет вид нормального распределения, в остальных состояниях имеет вид логнормального. Средняя локальная толщина уменьшается в 2-3 раза для серой почвы и в 1,5-2 раза для чернозёма.

Распределение объёмов порового пространства имеет логнормальный вид во всех состояниях для всех агрегатов. В ходе эксперимента средняя локальная толщина пор в агрегатах меняется слабо и варьирует на 10% от среднего значения (105 мкм). Изменения геометрической организации агрегатов чернозёма под воздействием многократного увлажнения и иссушения выражены слабее, чем для агрегатов серой почвы, что отражает большую водоустойчивость агрегатов чернозёма.

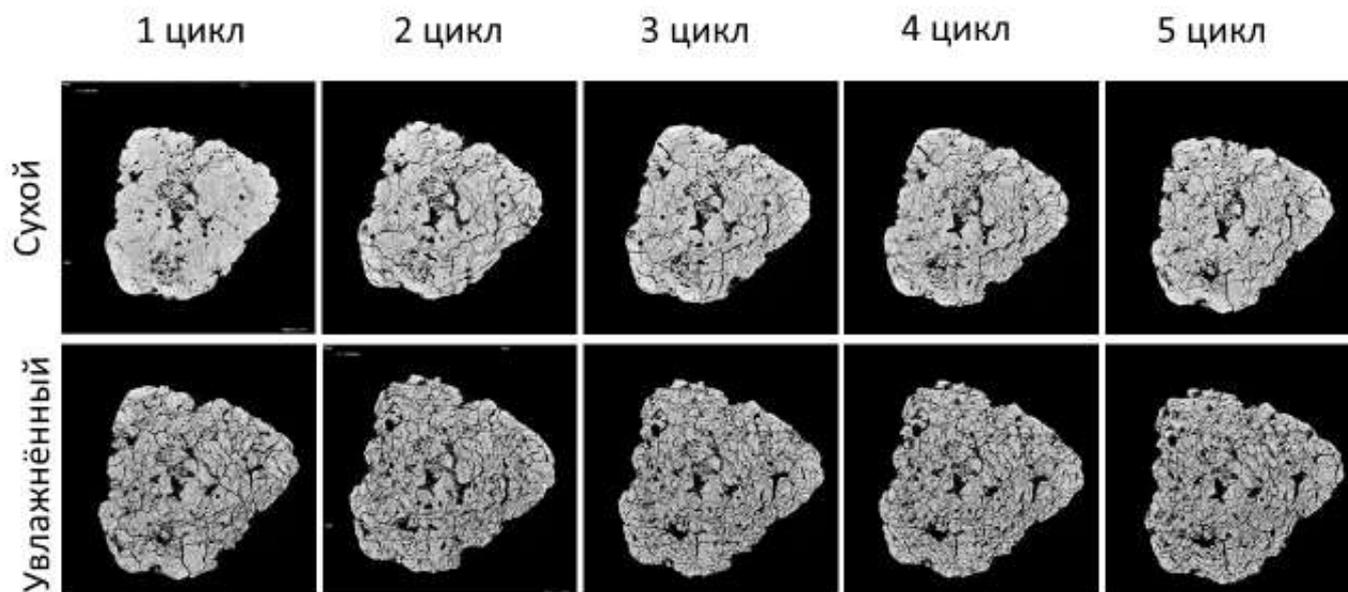


Рис.1. Морфологические изменения агрегата чернозёма в циклах увлажнения-иссушения



Рис.2. Распределение объёма твёрдых структурных компонентов по локальной толщине для агрегата в первом цикле увлажнения

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-04-01056 с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.



УДК 631.4

ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РЕЖИМЫ СЕРЫХ ПОЧВ ЗАПОВЕДНИКА «БЕЛОГОРЬЕ»

Романов Олег Васильевич

Кафедра почвоведения и экологии почв СПбГУ, Санкт-Петербург, Российская Федерация
O.romanov@spbu.ru

Oleg Romanov

PhD of biology sci, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Russia.

Annotation: The results of long-term studies differences physical status of soils (bulk density, air conductivity, texture, water content, and temperature dynamics) were investigated in the Southwest of the Central Russian Plain (the Belogor'e Reserve).

Актуально для современной науки комплексное биогеоэкологическое изучение живой природы и разработка научных основ рационального использования и сохранения её ресурсов является заповедник «Лес на Ворскле» – из старейших особо охраняемых природных территорий России. Начало сохранению вековой нагорной дубравы на р. Ворскла положило создание в 1640 году Хотмыжского участка Белгородской защитной черты или оборонительной линии для защиты южных рубежей государства от татарских и ногайских набегов (Загоровский, 1969). Организация заповедника "Лес на Ворскле" непосредственно связана с именем профессора С. И. Малышева. На общем собрании культурно-просветительской комиссии при Борисовском обществе "Народный дом" 30 января 1920 года С. И. Малышевым был сделан доклад "Об охране природы и устройстве защитного участка в Борисовской лесной даче" (Аренс, 1925; Кузнецов, 1926; Халифман, 1978 и др.). Это событие можно считать отправной точкой в борьбе за сохранение вековой нагорной дубравы и организацию заповедника "Лес на Ворскле".

В 1934 году вековая нагорная дубрава заповедника "Лес на Ворскле" привлекла внимание В. Н. Сукачева, заведовавшего в те годы кафедрой геоботаники Ленинградского университета. В 1951 году постановлением Совета Министров СССР было ликвидировано большинство заповедников, а площадь оставшихся значительно сокращена. Почти на три десятилетия "Лес на Ворскле" стал учебно-опытным лесным хозяйством Ленинградского государственного университета. С 50-х годов в "Лесу на Ворскле" вновь активизируется научная деятельность. Событием в научной жизни стало участие "Леса на Ворскле" в 1967-1974 гг. в Международной биологической программе, которая объединила под эгидой ЮНЕСКО ученых 67 стран мира в целях изучения биологической продуктивности основных типов экосистем планеты. Распоряжением Правительства Российской Федерации в 1999 г. заповеднику "Лес на Ворскле" переданы, расположенные на территории Белгородской области, участки Центрально-Черноземного государственного природного биосферного заповедника имени профессора В. В. Алехина "Ямская степь", "Лысые горы" (Губкинский район) и "Стенки-Изгорья" (Новооскольский район) общей площадью 1003 га, а государственный природный заповедник "Лес на Ворскле" переименован в государственный природный заповедник "Белогорье".

Первые измерения влажности почвы, выполненные по инициативе акад. В.Н.Сукачёва и проф. Д.Н.Кашкарова ещё в 1939 году, дали начальные представления о профиле



распределении влажности почвы в липово-дубовом лесу в течение вегетационного сезона (Карандина, 1949). По терминологии А.А.Роде (1969) и последующие работы носили эколого-гидрологический характер (Нешатаев, Старостина, 1962). Систематические генетико-гидрологические исследования почв заповедника, ставившие целью не только оценить экологическую роль почвенной влаги, но и установить тип водного режима, определить элементы водного баланса и сопоставить их с показателями других нагорных дубрав лесостепи, были начаты в 1958 г. П.А.Яюком и О.Г.Растворовой. Регулярные режимные наблюдения вели без перерыва до 80-х годов XX века, после чего приобрели эпизодический характер. В XXI веке эти исследования продолжили В.С.Зуев, Н.Н.Фёдорова, Г.А.Касаткина, А.И.Попов, С.Н.Чуков и др.

Объекты и методы

Изучали водный режим автоморфных почв заповедника, сформировавшихся в плакорных условиях (ровные участки правобережного плато р. Ворскла с абс. отметками выше 185 м н.у.м.) и в квазиплакорных условиях (верхние, выложенные части приречных склонов с отметками 185-170 м н.у.м.). Эти два типа местообитаний относя к разным по возрасту древним речным террасам (Назаренко, 1962; Нешатаев и др., 1967; Гаель и др., 1986). На местности перепад высот слабо выражен, почвообразующая порода – лёссовидные суглинки, глубина залегания грунтовых вод превышает 30 м, что определяет однотипный – непромывной тип водного режима. В связи с эрозийной расчленённостью рельефа наиболее распространёнными являются серые почвы Счастливая Л.С., 1966, 1967, 1969 и др.). Тёмно-серые и серые почвы можно считать «главными» на территории заповедника и являются репрезентативным объектом почвенно-гидрологических исследований.

1. Тёмно-серые почвы. Изучали участок высокоствольного 300-летнего липо-дубняка снытевого (8 квартал). Этот участок в своё время стал объектом комплексных исследований по Международной Биологической программе (Советская национальная..., 1969) как наиболее представительный в геоботаническом и почвенном отношении для нагорных дубрав Юго-западного ската Средне-Русской возвышенности. Регулярные режимные наблюдения проводили в 1966-1979 гг. Опубликована только часть материалов (Растворова, 1974; Растворова и др., 1993, 1995).

2. Серые почвы (слабо и среднеподзолённые). Содержание гумуса 4,95-5,74 %) на стыке 7-го, 9-го и 10-го кварталов. Помимо неизменного участка («лес-контроль») изучали вариант с удалённым подлеском, травяным покровом и подстилкой («лес-пар») в опыте, заложенном А.А.Краснюком в 1956 г. А также серые под культурами различных древесных пород, заложенными в 1938-1939 гг. Часть материалов опубликована (Растворова 1966, Растворова, 1968). Данные о динамике влагозапасов опубликованы в диссертационной работе О.Г.Растворовой (1968).

Влажность почв измеряли термостатно-весовым методом. Образцы отбирали буром с диаметром режущей части 50 или 38 мм послойно: 0-5, 5-10 и далее через 10 см. Мощность толщи, охваченной наблюдениями – 400 см. В годы, не являющиеся экстремально влажными, мощность слоя зимне-весеннего промачивания на превышала в лесу 150-200 см и только в безморозные зимы промачивание превышает 3 м. Как показали результаты рекогносцировочного бурения до 5,5 м влажность почвы была значительно ниже наименьшей (полевой) влагоёмкостью.

Наблюдения проводили при максимальном влагозапасе (после снеготаяния, в апреле). С наибольшей частотой измерения проводили в июне-августе, т.к. в это время влажность верхнего, насыщенного корнями растений слоя достигает критических (низких) значений.



Повторность закладки скважин – 3-кратная, 5-кратная в лесу и 2-3 кратная на поле. Коэффициент варьирования – в пределах от 3 до 24% (максимальные значения наблюдали на нижней границе смоченного слоя – из-за извилистости границ): после снеготаяния на глубине 120-150 см после летних ливней – в пределах слоя 0-10, реже 0-20 см.

Наименьшую (полевую влагоёмкость) (НВ) определяли как равновесную влажность на заливных площадках, время стекания воды – 3 суток. Коэффициент варьирования величины НВ в слое 0-20 составлял 9-12%, в слое 20-100 см – 3,5-8, глубже 1 м около 10 %, т.е. невелик для такой гетерогенной среды как почв, ошибка при $P_{0,95}$ составила 1-3 % (Растворова, Подалинская, 1973).

Влажность разрыва капиллярной связи определяли по Долгову-Мацкевич (Растворова, 1983). Для определения влажности завядания (ВЗ) использовали 2 показателя, соответствующие «умеренной» и «экстремальной» засухи (ВЗ-1 и ВЗ-2). За величину ВЗ-1 принимали влажность почвы, вызывающую проявление у мезофильных дубравных растений стресс: потерю тургора листьев (обычно обратимую), полегание сныти, эффект т.н. обратного отрицательного роста стволов (Растворова, Самиляк 1977; Самиляк, Растворова, Нешатаев, 1978). ВЗ-1 близка к влажности по Францессону (десорбция паров влаги при 98% относительной влажности воздуха – МГ); величина ВЗ-2 хорошо совпадает с минимальными значениями «остаточной» влажности почв, наблюдаемой в конце засушливых вегетационных сезонов. Уместно вспомнить, что коэффициент 2,0 при расчёте влажности завядания серых почв по величине МГ применялся и ранее (Фальковский, 1931; Павленко, 1955).

Водоудерживающую способность почв (зависимость давления почвенной влаги от влажности) определяли гигроскопическим, криоскопическим и тензиометрическим методами. Плотность почвы определяли методом режущих цилиндров объёмом 250 и 100 см³. Коэффициент варьирования составил 2-12 %, при 3-4 кратной повторности – 5 % точность при $P_{0,95}$.

Конечно, если осадки не нормированы по тепловым характеристикам, трудно сопоставить их роль в разные сезоны. Использовали гидротермический коэффициент (ГТК) по Селянинову (Качинский, 1970) – отношение десятикратного количества осадков за какой-либо отрезок вегетационного периода к сумме температур за тот же период. Для летних месяцев величина ГТК колеблется около 0,9-1,1 (минимальные среднесезонного значения ГТК – 0,4, максимальные – 1,6. Отмечается тенденция нарастания среднесезонного ГТК.

Текстурная дифференциация профиля серых почв маскирует или утрирует различия во влагосодержании в разных частях профиля, если влажность почвы выражена в процентах от объёма или массы. Анализ этой динамики проведён с помощью хронроизоплет, построенных с учётом категорий почвенной влаги. Как правило, верхняя часть почвенно-грунтовой толщи (1-1,2 м) в лесостепной дубраве ежегодно испытывает колебания влажности во всём её диапазоне – от НВ в конце весны до ВЗ в конце вегетационного периода. Наиболее резкие перепады влажности почвы – в верхних горизонтах гумусово-аккумулятивном и элювиальном. В иллювиальных горизонтах абсолютные значения влажности менее выражены и не превышают 10 % от массы, т.к. весь диапазон активной влаги находится между значениями 23 и 13 % от массы почвы.

В иллювиальном горизонте серых почв, так же, как и в почвообразующей породе, сезонный ход изменения влажности практически всегда в вегетационный период имеет направление – иссушение (летние осадки обычно не участвуют во влагообороте этих горизонтов. Такие особенности режима влажности этих горизонтов серых почв (аккумулятивной и иллювиальной частей профиля) неизбежно должны отразиться на



биологических и физико-химических процессах в соответствующих горизонтах и способствовать дифференциации профиля по морфологическим признакам.

Форма кривых зависимости давления почвенной влаги от влажности для изученных серых почв различна для разных горизонтов: при уменьшении влажности от 30-40 до 2-10% от массы почвы величина давления почвенной влаги снижалась на несколько порядков. В гумусово-элювиальной части профиля, с более рыхлым сложением и более крупными порами, величинами НВ и ВРК соответствуют меньшие значения величин всасывающего давления. Если в верхних горизонтах (влажность больше ВРК) давление от -8 до -60 кПа, то в иллювиальной части профиля – от -33 до -130 кПа. Влажности завядания (ВЗ-2) во всех случаях соответствует давление -2000 кПа (-20 атм.).

Размеры эвапотранспирации (ЭТ) за период многолетних наблюдений остаются относительно постоянными, а также близки к значениям, приводимым в литературе для других лесостепных дубрав (Зонн, 1951, 1955; Павленко, 1955; Роде, 1968, Молчанов, 1970). В самых контрастных случаях величины ЭТ различаются по годам всего в 1,7 раза, тогда как суммы осадков – более чем в 3 раз, а расход влаги из почвы – почти в 10 раз. Это позволяет сделать вывод о значительной буферности системы влага почв-вала атмосферы, о смягчающем влиянии на летнюю засуху той влаги, которая накоплена почвой в холодный сезон данного года и в предшествующие периоды. Общий расход на эвапотранспирацию (из почвы плюс осадки) в посадке дуба составлял около 400 мм. Причинами различий под разными насаждениями могут служить длительность периода вегетации и облиствения, строение крон, определяющее их способность удерживать осадки, мощность и влагоёмкость подстилки. Дифференциация показателей водного режима почв под различными лесными культурами является отражением генетических особенностей древесных пород.

Изучение режима влажности почв на землях сельскохозяйственного назначения, прилегающих непосредственно к посадкам древесных культур позволяет сделать вывод, что степень гидрологического сходства-отличия между полем и лесом зависит от «транспирационной мощности» агрофитоценозов. По мере превращения пашни в залежь с многолетней травянистой растительностью потребление влаги увеличивается, а различия показателей водного режима лесных и безлесных участков сокращаются.



УДК 51-76:57.087

О НЕКОТОРЫХ НЕКОРРЕКТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ФИЗИКИ ПОЧВ

Сабреков А.Ф.¹, Глаголев М.В.^{1,2,3}

¹Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация
sabrekovaf@gmail.com

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

³Институт лесоведения РАН, с. Успенское Московской обл., Российская Федерация
m_glagolev@mail.ru

ON SEVERAL ILL-POSED MATHEMATICAL PROBLEMS OF SOIL PHYSICS

Sabrekov A.F.¹, Glagolev M.V.^{1,2,3}

¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

²Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

³Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe (Moscow region), Russia

Annotation: Several well-known mathematical models of concentration fields in the soil (both at the aggregate and the profile scales) are considered. It is shown that the respective boundary value problems for steady-state profiles belong to the class of ill-posed problems, since their solution does not exist. It occurs because the used set of processes (for example, diffusion transport + first-order kinetic of the consumption) restricts possible boundary conditions, which, therefore, can no longer be arbitrary. Ill-posed inverse problems are also briefly described.

Введение

В настоящее время методы математической обработки результатов экспериментов и математического моделирования в экологии и почвоведении используются весьма широко и продолжают развиваться (Balland et al., 2008; Глаголев, 2008; Vohn et al., 2013; Шеин и Рыжова, 2016). При этом основные математические задачи в почвоведении оказываются аналогичны (или даже тождественны) задачам математической физики.

Как известно, задачи математической физики можно разделить на прямые и обратные. Прямыми называют задачи, для которых заданы причины, а искомыми величинами являются следствия. Обратными будут задачи, в которых известны следствия, а неизвестными выступают причины (Самарский и Вабищевич, 2004, с. 25). Например, свойства почвы и интенсивность поступления органики в нее являются причиной формирования конкретного профиля концентраций органического вещества (ОВ). Поэтому расчет такого профиля на основе известных почвенных свойств и интенсивности опада будет прямой задачей, а расчет почвенных свойств или интенсивности опада, исходя из профиля органики – обратной. Кроме деления задач на прямые и обратные существует и другая классификация, в которой выделяют корректные и некорректные задачи.

Если заданы множества допустимых входных данных F и возможных решений V , то вычислительная задача определения $v \in V$ по данным $f \in F$ из уравнения $\hat{A}v = f$ (где \hat{A} – непрерывный оператор, действующий из пространства решений в пространство входных данных) считается поставленной *корректно*, если: 1) ее решение v существует $\forall f \in F$; 2) задание f однозначно определяет v (т.е. для каждой f решение v единственно); 3) решение устойчиво, т.е. малым изменениям входных данных f соответствуют малые отклонения результата v (Чудновский, 1976, с. 84). При этом *неустойчивость* означает, что решение не является непрерывной функцией данных, т.е. малому возмущению данных может соответствовать произвольно большое возмущение решения (Жданов, 2007, с. 20).



К сожалению, в русском языке оба термина – «некорректная» и «некорректно поставленная» – (использующиеся для тех задач, для которых хотя бы одно из вышеперечисленных требований корректности не выполнено), имеют некоторое отрицательное звучание и подсознательно воспринимаются так, будто бы поставившие их исследователи что-то сделали неправильно. Конечно, бывает и такое, но, в общем-то, это – просто термины очерчивающие определенный класс математических задач. Более того, часто некорректная постановка позволяет осознать некоторые важные свойства изучаемого объекта. Чтобы в дальнейшем избежать указанной отрицательной коннотации, мы ниже будем использовать для некорректных задач сокращение ИРоР (от соответствующего английского термина «Ill-Posed Problems»). ИРоР могут возникать как среди прямых, так и среди обратных задач. По-видимому, в литературе больше внимания уделялось обратным ИРоР – см., например, (Воскобойников и др., 1984; Самарский и Вабищевич, 2004; Жданов, 2007; Глаголев и Сабреков, 2012), но в почвоведении часто встречаются и прямые ИРоР. Поэтому в данной работе мы будем рассматривать, в основном, их.

Некорректные прямые задачи расчета пространственных профилей концентраций

Возникновение некорректности из-за нарушения условия существования решения мы рассмотрим прежде всего на примере одной из моделей концентрационного профиля ОВ. Так, в (Смагин и др., 2001, с. 85-86), среди прочих, представлена стационарная модель, основанная лишь на допущении о диффузионном механизме распределения ОВ в сочетании с биодеструкцией, идущей по кинетике 1-го порядка:

$$D \cdot d^2C/dz^2 = k \cdot C, \quad (1)$$

где z – вертикальная координата (м), C – концентрация ОВ (кг/м³), D – феноменологический показатель массопереноса (диффузии) ОВ (м²/год), k – константа скорости реакции 1-го порядка. В качестве граничных условий (ГУ) были выбраны: во-первых, поток ОВ в виде гумифицированного опада (L , кг/м²/год) на поверхности почвы; и, во-вторых, постоянство концентрации на большой глубине (при $z \rightarrow \infty$):

$$-D \cdot dC/dz|_{z=0} = L; \quad C(\infty) = C_0 \quad (2)$$

(там же упоминается и другое «условие большой глубины»: $C(h) = C_0$ при большом, но конечном h ; однако поскольку в первоисточнике приводится решение только для (2), то мы будем рассматривать краевую задачу именно с этим ГУ). «Решение» данной задачи предложено в виде $C = C_{(z)} - C_0$, где $C_{(z)} = C_0 + (k \cdot D)^{-1/2} \cdot L \cdot \exp(-z \cdot [k/D]^{1/2})$. Следовательно, $C = (k \cdot D)^{-1/2} \cdot L \cdot \exp(-z \cdot [k/D]^{1/2})$. Но совершенно очевидно, что такая функция решением не является, ибо $C(\infty) = (k \cdot D)^{-1/2} \cdot L \cdot \exp(-\infty) = 0$, тогда как, согласно (2), должно быть $C(\infty) = C_0$. Можно подумать, что при записи решения допущена какая-то ошибка, которую легко исправить. Однако проблема гораздо глубже: решение задачи (1)-(2) вообще не существует (и поэтому данная задача относится к классу ИРоР). Докажем это.

Как известно (Камке, 1976, с. 365), общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$C(z) = C_1 \cdot [\exp(z \cdot \lambda) + \exp(-z \cdot \lambda)] + C_2 \cdot [\exp(z \cdot \lambda) - \exp(-z \cdot \lambda)], \quad (3)$$



где C_1 и C_2 – произвольные постоянные, а $\lambda = (k/D)^{1/2}$. Его можно переписать так: $C(z) = [C_1 + C_2] \cdot \exp(z \cdot \lambda) + [C_1 - C_2] \cdot \exp(-z \cdot \lambda)$, откуда видно, что ограниченное решение для $z \rightarrow \infty$ возможно только при $C_1 = -C_2$. Следовательно, $C(z) = -2 \cdot C_2 \cdot \exp(-z \cdot \lambda)$, но, как видим, при $z \rightarrow \infty$ $C(z)$ не может принимать произвольное значение C_0 , а неизбежно будет нулевым: $C(\infty) = -2 \cdot C_2 \cdot \exp(-\infty \cdot \lambda) = 0$.

Приведенный пример далеко не единственный. Вообще в почвоведении задачам расчета пространственных профилей концентраций часто «не везет» с корректной постановкой. Чтобы не быть голословными, приведем еще лишь два примера, которые рассмотрим не столь подробно, как вышеприведенный. В (Смагин и др., 2001, с. 86-87) представлено развитие модели (1) с учетом того, что источником ОБ в почве могут служить корневые системы:

$$D \cdot d^2C/dz^2 = k \cdot C - R \cdot \exp(-b \cdot z), \quad (4)$$

где R – интенсивность поступления ОБ из корневых систем ($\text{кг} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$), распределенных в почве с «крутизной» b ($1/\text{м}$). В качестве ГУ опять взяты (2). Эта задача так же относится к классу ИРОР, поскольку ее решение не существует.

Действительно, как известно (Корн и Корн, 1970, с. 269-270), общее решение (ОР) неоднородного уравнения (4) можно представить в виде суммы его частного решения и ОР соответствующего однородного уравнения (ОдУ) – в данном случае таким ОдУ будет (1), а его ОР – (3). Легко проверить, что функция $u(z) = [R/(k-D \cdot b^2)] \cdot \exp(-b \cdot z)$ является частным решением уравнения (4). Следовательно, ОР уравнения (4) имеет вид:

$$C(z) = C_1 \cdot [\exp(z \cdot \lambda) + \exp(-z \cdot \lambda)] + C_2 \cdot [\exp(z \cdot \lambda) - \exp(-z \cdot \lambda)] + [R/(k-D \cdot b^2)] \cdot \exp(-b \cdot z),$$

откуда опять видно, что при $z \rightarrow \infty$ возможно единственное ограниченное решение – нулевое, следовательно мы снова не можем удовлетворить на бесконечности ГУ с произвольным значением C_0 . А значит решение задачи (2), (4) для $C_0 \neq 0$ не существует, иначе говоря она относится к классу ИРОР.

В заключение данного раздела совсем кратко упомянем рассмотренную в (Смагин, 2005, с. 206-207) модель биогенного потребления O_2 микроорганизмами внутри влажного почвенного агрегата, имеющего форму шара:

$$(D/r^2) \cdot d(r^2 \cdot dC/dr)/dr = k \cdot C, \quad (5)$$

где C – концентрация O_2 ; r – расстояние от центра агрегата ($0 \leq r \leq r_m$; r_m соответствует поверхности агрегата); полная постановка задачи кроме (5) включает следующие ГУ:

$$C(0) = 0; \quad C(r_m) = C_0, \quad (6)$$

здесь $C_0 > 0$ имеет смысл концентрации O_2 на поверхности агрегата (и зависит от глубины его расположения в почве). «Решение» краевой задачи (5)-(6) представлено автором в виде $C = (C_0 \cdot r_m/r) \cdot [\exp(r \cdot \lambda) - \exp(-r \cdot \lambda)] / [\exp(r_m \cdot \lambda) - \exp(-r_m \cdot \lambda)]$. Но совершенно очевидно, что такая функция решением не является, ибо, применив правило Лопиталья, легко показать, что $C(0) = 2 \cdot C_0 \cdot r_m \cdot \lambda / [\exp(r_m \cdot \lambda) - \exp(-r_m \cdot \lambda)] > 0$, тогда как, согласно ГУ (6), должно быть $C(0) = 0$. Вообще, можно доказать, что решение задачи (5)-(6) не существует: для уравнения (5) и ГУ $C(r_m) = C_0$ всегда $C(r_m) > 0$, следовательно, удовлетворить ГУ $C(0) = 0$ невозможно. Таким образом, задача (5)-(6) относится к классу ИРОР.



Как уже говорилось выше, этот факт не следует воспринимать как-то негативно. ИРОР появилась в том случае, когда автор исходил из набора некоторых предположений и экспериментальных фактов: (а) внутри агрегата происходит только диффузионный перенос; (b) потребление O_2 удовлетворяет кинетике 1-го порядка; (с) в центре агрегата оксиметр фиксирует нулевую концентрацию O_2 ... Возникновение ИРОР (при постановке *прямой задачи*) заставляет проанализировать все предположения и «факты» в поисках тех из них, которые вероятнее всего содержат неточности (не реализуются в действительности). Например, из числа вышеперечисленных пп. (а)-(с) наименьшие вопросы вызывает (а). Но вот то, что кинетика могла отличаться от 1-го порядка представляется вполне вероятным, и тут надо исследовать – как изменение типа кинетики (в допустимых пределах) повлияет на корректность задачи. А то, что концентрация O_2 в центре агрегата была малой (за пределами чувствительности прибора), но, все-таки, не нулевой, вообще кажется весьма вероятным. К счастью, аналогичную модель строили и Гончар-Зайкин и др. (1981). Они показали, что небольшое видоизменение дает корректную постановку задачи: нужно вместо нулевого ГУ потребовать *ограниченности решения* при $r_m = 0$. Таким образом, анализ причин некорректности приводит к возможности обоснованного выбора дальнейших путей изучения почвенного объекта путем эксперимента: использование более точных измерений должно показать будет ли концентрация O_2 в центре агрегата отличаться от нуля.

О некорректных обратных задачах интерпретации результатов измерений

Поскольку сложные процессы и объекты, как правило, оказываются недоступными для непосредственного наблюдения и могут изучаться лишь по их косвенным проявлениям, то возникает целый комплекс нетривиальных проблем интерпретации экспериментальных данных (Воскобойников и др., 1984, с. 4) с целью решения обратных задач идентификации параметров этих процессов и объектов. В настоящее время решение обратных задач все шире используется в физике почв.

К сожалению, многие обратные задачи являются ИРОР (Жданов, 2007, с. 20). К ним относятся: задача дифференцирования функции, заданной приближенно (т.е. сигнала, измеренного с погрешностью); построение эмпирической плотности распределения; решение некоторых типов интегральных уравнений; идентификация параметров сложных моделей (здесь решающее значение для корректности/некорректности имеет соотношение сложности модели и информативности эксперимента) и целый ряд других задач. По-видимому, одним из первых вопросов о некорректных обратных ИРОР в почвоведении затронул А.Ф. Чудновский (1976, с. 83-87), рассмотревший некорректно поставленную ИРОР теплопроводности почвы и методы ее решения. В дальнейшем некоторые обратные ИРОР экологии и почвоведения были рассмотрены в (Айзатуллин и Лебедев, 1977, с. 10; El Badia et al., 2005; Глаголев и Сабреков, 2008; Сабреков и др., 2018). Корректное решение этих задач может быть получено на основе разнообразных методов регуляризации (детерминированной, статистической или дескриптивной) – см., например, (Чудновский, 1976, с. 87; Воскобойников и др., 1984; Самарский и Вабищевич, 2004; Жданов, 2007).

Литература

- Айзатуллин Т.А., Лебедев Ю.М. (1977) Моделирование трансформации органических загрязнений в экосистемах и самоочищения водотоков и водоемов. *Общая экология. Биоценология. Гидробиология. (Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР)*. **4**, 8-74.
- Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. (1984) Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука. СО.



- Глаголев М.В. (2008) Эмиссия метана: идеология и методология «стандартной модели» для Западной Сибири. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата* **S1**, 176-190.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. (2008) О восстановлении плотности вероятности методом гистограмм в почвоведении и экологии. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата* **S1**, 55-83.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. (2012) Идентификация газообмена на границе экосистема/атмосфера: метод обратной задачи. *Математическая биология и биоинформатика* **7(1)**, 81-101.
- Гончар-Зайкин П.П., Дынкин Л.Д., Дынкин С.Д., Журавлев О.С. (1981) Модель газообмена в системе «микроорганизмы-почва-атмосфера». *Моделирование биогеоценологических процессов*. М.: Наука, 142-148.
- Жданов М.С. (2007) Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир. 712 с.
- Камке Э. (1976) Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука. 576 с.
- Корн Г., Корн Т. (1970) Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 720 с.
- Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Терентьева И.Е., Мочёнов С.Ю. (2018) Идентификация скорости потребления метана в почвах методом обратной задачи. *Математическая биология и биоинформатика Доклады VII Международной конференции*, e95.1-e95.5.
- Самарский А.А., Вабищевич П.Н. (2004) Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Едиториал УРСС. 480 с.
- Смагин А.В. (2005) Газовая фаза почв. М.: Изд-во МГУ. 301 с.
- Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. (2001) Моделирование динамики органического вещества почв. Москва.
- Чудновский А.Ф. (1976) Теплофизика почв. М.: Наука. 352 с.
- Шейн Е.В., Рыжова И.М. (2016) Математическое моделирование в почвоведении. М.: «ИП Маракушев А.Б». 377 с.
- Balland V., Pollacco J.A.P., Arp P.A. (2008) Modeling soil hydraulic properties for a wide range of soil conditions. *Ecological Modelling* **219**, 900-916.
- Bohn T.J., Podest E., Schroeder R., Pinto N., McDonald K.C., Glagolev M., Filippov I., Maksyutov S., Heimann M., Chen X., Lettenmaier D.P. (2013) Modelling the large-scale effects of surface moisture heterogeneity on wetland carbon fluxes in the West Siberian Lowland. *Biogeosciences* **10**, 6559-6576.
- El Badia A., Ha-Duong T., Hamdi A. (2005) Identification of a point source in a linear advection–dispersion–reaction equation: application to a pollution source problem. *Inverse Problems* **21**, doi:10.



УДК 631.4

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОРФЯНЫХ ПОЧВ.

Сорокина Н.В., Шеин Е.В., Позднякова А.Д.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия,
rebelde1502@mail.ru

Annatation. The water retention curve (WRC), density, botanical composition, and ash contents were determined for high-ash lowmoor peat soils (Rheic Sapric Histosols) developing on the floodplain of the Yakhroma River (Moscow oblast). The WRC was determined by capillarimetric method in the range of water pressure from 0 to 80–90 кПа. For the studied peat soils, the WRC represents a close to linear dependence of the water content on the water pressure in semilogarithmic scale. In contrast to mineral soils, a characteristic point of the air-entry pressure is virtually absent on the WRC of peat soils. The WRC of peat largely depended on their density: denser peat samples were characterized by a higher water content at the same water pressure, which attests to the increased water retention capacity. An increase in the degree of decomposition of peat and its ash content also leads to the rise in the water retention capacity, but the effect of these factors is considerably smaller than the effect of peat density.

В физике почв одним из основных понятий для минеральных почв является основная гидрофизическая характеристика (ОГХ): изотермическая равновесная зависимость между капиллярно-сорбционным (матричным) давлением почвенной влаги и объемной влажностью. Кривую ОГХ нередко называют кривой водоудерживания (это прямой перевод с англоязычного “water retention curve”). Водоудерживание исследовали в течении десятилетий, результатами являются многочисленные разработки явлений передвижения и удержания воды в почвах, а также доступности почвенной влаги для растений. Если данных по ОГХ минеральных почв, методов интерпретации, аппроксимации экспериментальных данных, использования в расчетных моделях к настоящему времени много, то в отношении торфяных почв имеются лишь эпизодические наблюдения. Одно из основных отличий торфа от минеральных почв – большое содержание гидрофильных коллоидов и различных частиц, имеющих растительное происхождение. Вместе с тем макро- и микроструктура торфа позволяет удерживать воду за счет механической связи органических остатков. К такой воде относятся капиллярная, внутриклеточная, иммобилизованная и структурно захваченная влага. Как правило, водный режим торфоземов складывается напряженно: в условиях засушливого года на мелкозалежных торфяниках, подстилаемых песком, к концу мая–началу июня расходуются все продуктивные влагозапасы 50-сантиметрового слоя, а к концу июня – вся доступная влага. Именно поэтому проблема гидрологии торфяников, исследование гидрофизических свойств торфоземов, определяющих прогнозные расчеты с учетом гидрологических и метеорисков, представляется актуальной.

Цель работы: исследовать зависимость основной гидрофизической характеристики различных органогенных почв от плотности и других свойств.

Объекты исследования

Объектом исследования был выбран низинный торф поймы р. Яхромы в пределах территории Дмитровского филиала Всероссийского института сельскохозяйственного использования мелиорированных земель – ДФ ВНИИМЗ.

Территория разделена на 2 участка: стационар «Ближний» и стационар «Дальний». Первый находится в сельскохозяйственном использовании с 1914 года, т.е. около 100 лет, последний с 1961-1965 гг., т.е. около 50 лет. В настоящее время оба стационара интенсивно



используются в сельском хозяйстве с большой насыщенностью севооборотов пропашными культурами, с обильным внесением удобрений, необходимых для каждой культуры.

Образование почвенного покрова отличается по влиянию разных факторов почвообразования. На 100летнем участке определяющими факторами являются это (1) река Яхрома, находящаяся довольно близко к участку, в период разливов сформировала торфоземы агроминеральные; (2) мощные напорные железисто-карбонатные воды, выклинивающиеся в притеррасной части поймы. На данном участке было выбрано 5 торфоземов для исследования, в каждом из которых было взято по 2 образца с глубин 5 – 15 см и 25 – 40 см. Первые два участка располагаются на стационаре «Дальний»: торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа и торфоземы, развитые на мощной ревесной торфяной залежи и 3 - на «ближнем»: торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа, торфоземы агроминеральные и торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами.

Результаты и обсуждение

Целью одного из проведенных экспериментов было определение влияния плотности на кривую основной гидрофизической характеристики торфяных почв разного ботанического состава. Результаты представлены в виде графиков в координатах « pF – объемная влажность».

При естественной плотности (до 0.4 г/см^3) наибольшей водоудерживающей способностью обладали торфоземы, развитые на древесном торфе, подстилаемые залежью травяного, осокового торфа. Как правило, несколько меньшей водоудерживающей способностью обладали торфоземы на разнотравно-гипновом и гипновом торфе, обогащенные карбонатами, а наименьшей – торфоземы агроминеральные.

Вторым фактором, влияющим на положение кривой ОГХ является зольность. К зольным элементам как правило относятся P, K, Ca, Mg и др. В составе золы данных торфов наблюдается повышенное содержание Ca и Fe, в то время, как и в большинстве торфов содержание K в них незначительное. Для данных ионов характерен такой процесс как гидратация – образование гидратной оболочки. В процессе попадания воды в почву происходит связывание воды за счет образования указанных гидратированных ионов в растворе. К тому же, может происходить образование кристаллогидратов. В почве содержатся различные соединения металлов, которые в свою очередь могут взаимодействовать с водой. В этом случае, будет проходить разрушение кристаллической решетки и последующая сольватация (гидратация) ионов. Таким образом, если часть воды связывается химически, то повышается водоудерживающая способность.

Еще одной не менее важной характеристикой торфяных почв является их степень разложения. Под ней понимается содержание бесструктурной массы, содержащей гуминовые вещества и остатки растений. При разложении происходит измельчение торфяной почвы, она начинает напоминать коллоидальную массу темного цвета. Как известно, размер частиц напрямую влияет на поведение кривой ОГХ: чем меньше размер частиц и чем тонких частиц больше, тем выше водоудерживание. Экспериментальные данные показывают, что описанная закономерность прослеживается и для торфа: чем выше степень разложения, тем правее расположена кривая ОГХ.



Вывод

Наибольший вклад в изменение положения кривой ОГХ несет плотность. Незначительные ее изменения на $0,15 \text{ г/см}^3$ ведут к резкому смещению графика «вправо». Увеличение таких величин как зольность и степень разложения, также позволяет нам говорить об аналогичной зависимости, но менее ярко выраженной. По всей видимости именно эти показатели будут являться основными свойствами-предикторами при получении педотрансферных функций для органогенных почв.



УДК 631.4

ОСНОВНАЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АГРЕГАТОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОДИСТОЙ ПОЧВЫ

Суздалева А.В., Шеин Е.В.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
avsuzdaleva@gmail.com

WATER RETENTION CURVE CHARACTERISTICS OF THE AGGREGATES SODDY-PODZOLIC SOIL
Shein E.V., Suzdaleva A.V
Soil Science Faculty, Moscow State University named M.V.Lomonosov, RF

Annotation: Two approaches to the construction of the water retention curve on the basis of pedotransfer functions are considered in this article. Modern pedotransfer functions are based mainly on statistical connections between basic soil parameters and functional hydrophysical parameters. A. D. Voronin theoretically predicted the presence of physically based relationships between moisture pressure and humidity, which implies the development of physically based mathematical description of the relationship of physical and hydrological properties of soils.

Введение

В данной работе рассмотрены основные положения двух подходов по определению почвенно-гидрологических констант из основной гидрофизической характеристики (ОГХ): (1) А.Д. Воронина, (2) общепринятого международного и применения педотрансферных функций на основе указанных двух подходов.

Основные научные труды А.Д. Воронина лежат в основе профессиональных компетенций современных почвоведов, широко применяются и активно развиваются в гидрологических исследованиях. Следует выделить три основных направления учения А.Д.Воронина: учение об иерархии структурных уровней организации, положения структурно-функциональной гидрофизики почв, раскрывающие взаимосвязь гидрологических параметров почвы со структурными особенностями самой почвы, анализ ОГХ и расчет ее средней части по «секущим Воронина». Подход А.Д. Воронина к моделированию и математическому описанию, выбор классификационных категорий базируется на физической обоснованности всех процессов, границы любых диапазонов опираются на смену «поведения» почвы в различных ее состояниях, а не на статистически удобные диапазоны. В современной гидрологии применяется весьма формальное количественное описание ОГХ, позволяющее главным образом гладко аппроксимировать функцию с целью последующего использования в расчетных прогностических моделях; это обуславливает использование не столько функции ОГХ, сколько параметров её аппроксимации (например, по ван-Генухтену) (Шеин. Рыжова, 2016).

Цель: сравнение подходов к восстановлению вида ОГХ по почвенно-гидрологическим константам.

Задачи:

1. Экспериментальное исследование ОГХ отдельных агрегатов агродерново-подзолистой почвы и определить гидрологические параметры (наименьшую и капиллярную влагоемкости, КВ и НВ, влажности разрыва капиллярной связи и завядания растений, ВРК и ВЗ)



2. Аппроксимировать экспериментальные данные, полученные путем построения секущих по Воронину и на основании международной принятой системы значений гидрологических констант и сравнить преимущества обоих подходов по критерию достоверности.

Объекты и методы

Объектом исследования послужили агрегаты 3-5 мм агро-дерново-подзолистой почвы. Были получены данные для построения ОГХ методами мембранного пресса и равновесия на насыщенных растворах солей в диапазоне pF от 0.1 до 5.6. Для определения гидрологических констант и соответствующих диапазонов влаги был применен метод построения «секущих» по А.Д.Воронину и международный подход. Полученные параметры были аппроксимированы по уравнению ван-Генухтена в программе RETC и получены традиционные параметры аппроксимации в виде значений θ_r , θ_s , α , n .

Результаты и обсуждение

По данным ОГХ были определены гидрологические константы: (1) по подходу Воронина («секущие» Воронина): наименьшая влагоемкость, $НВ=14,1\%$, капиллярная влагоемкость, $КВ=15,4\%$, влажность разрыва капиллярной связи, $ВРК=11,3\%$; (2) по международному подходу наименьшая влагоемкость, $НВ=12,1\%$, влажность завядания, $ВЗ=10,5\%$. Полученные значения давлений и влажности были аппроксимированы уравнением ван-Генухтена в программе RETC. При аппроксимации дополнительными и одинаковыми для обоих подходов величинами для кривой ОГХ были взяты полная влагоемкость, равная пористости агрегатов, и гигроскопическая влажность. Отметим, что если в современном классическом варианте ОГХ изображается как зависимость объемной влажности (θ) от давления влаги (pF), то в подходе А.Д.Воронина и в традициях российской школы гидрофизики ОГХ изображалась как зависимость давления влаги (pF) от массовой влажности (W). Для того, чтобы точно использовать подход А.Д.Воронина, соблюдая современные требования гидрофизики почв, мы изобразили ОГХ в виде зависимости W от pF , что позволило провести соответствующие «секущие» и применить аппроксимацию в виде уравнения ван-Генухтена. Такой вид ОГХ приведен на рис. 1

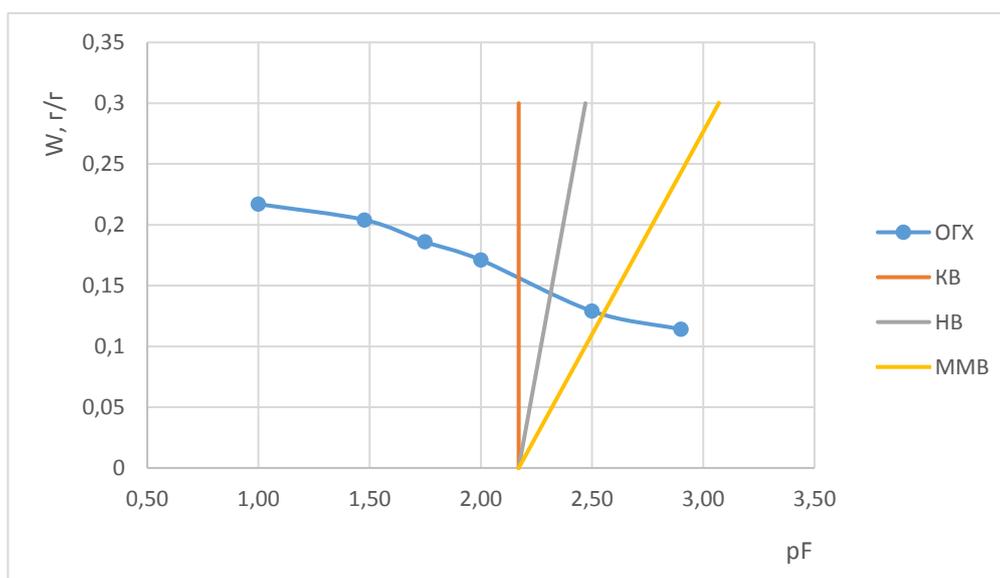


Рис. 1. ОГХ агрегатов $A_{\text{пах}}$ дерново-подзолистой почвы и «секущие» по Воронину.



Результаты аппроксимации ОГХ, параметры θ_r , θ_s , α , n с соответствующими статистиками представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры аппроксимации ОГХ по 3-м выборкам и соответствующие статистики

| Параметры | Экспериментальные | | По Воронину (1984) | | Международный подход | |
|------------|-------------------|-----------|--------------------|-----------|----------------------|-----------|
| | Среднее | Ст.ошибка | Среднее | Ст.ошибка | Среднее | Ст.ошибка |
| θ_r | 0,08854 | 0,01818 | 0,09976 | 0,01287 | 0,09918 | 0,00005 |
| θ_s | 0,21951 | 0,00436 | 0,24993 | 0,0129 | 0,54344 | 0,33593 |
| α | 0,01831 | 0,00383 | 0,01136 | 0,00506 | 17,52445 | 38,80509 |
| n | 1,62563 | 0,22835 | 2,64226 | 1,00465 | 1,34781 | 0,0025 |

Все параметры, полученные по методу Воронина достоверны с уровнем значимости 0,1. Для международного подхода - достоверны параметры остаточная влажность (θ_r) и n с уровнем значимости 0,1. Для параметра α обнаружено высокое значение среднеквадратических ошибок.

При сравнении двух подходов между собой, обнаружено, что параметры недостоверны при уровне значимости 0,1.

Была произведена оценка при помощи критерия достоверности различий параметров каждого из подходов с экспериментальными параметрами.

Параметры, рассчитанные по подходу А.Д.Воронина, оказались достоверными для параметра влажность насыщения (θ_s) с уровнем значимости 0,1; для международного подхода – все параметры не достоверны при уровне значимости 0,1. Оба подхода дают схожий результат для точки, определяющей начало ОГХ – влажность насыщения (θ_s). Однако параметры, определяющие кривизну и форму ОГХ в области средних значений влажности, лучше совпадают с реальными в подходе Воронина. Это можно объяснить тем, что в этом случае больше точек взаимосвязи pF и влажности в области капиллярной влаги (для КВ, НВ, ВРК), что дает лучшую аппроксимацию именно в этой области ОГХ. В отличие от статистически обоснованной общепринятой модели, где эта взаимосвязь указывается для капиллярной области (НВ=-330 см водного столба) и заметного иссушения до пленочной малоподвижной влаги – (ВЗ=-15 атм).

Выводы

1. В ходе экспериментального исследования ОГХ агрегатов горизонта $A_{\text{пах}}$ агродерново-подзолистой почвы были получены значения влажности для диапазона давлений (pF) от 0.1 до 5,6, агрегаты гомогенны по плотности (плотность составляла 1.36 г/см^3). Были получены следующие значения почвенно-гидрологических констант по подходу А.Д.Воронина («секущие» Воронина): НВ=14,1%, КВ=15,4%, ВРК=11,3% ; по международному подходу НВ=12,1%, ВЗ=10,5%.

2. По результатам аппроксимации для экспериментально изученной ОГХ и ОГХ, использующей почвенно-гидрологические константы по указанным методам, лучшую достоверность по t -критерию показал подход А. Д. Воронина – все параметры достоверны с уровнем значимости 0,1.

В сравнении двух подходов можно сделать вывод, что статистически обоснованная общепринятая модель позволяет удобным способом получить практически применимые данные, однако с учетом вариабельности ОГХ дает значительные ошибки. Для одного объекта в эксперименте без многочисленных повторностей подход А.Д. Воронина и



международный подход показали разные по достоверности параметры аппроксимации ОГХ. причем лучшую достоверность по t -критерию показал подход А. Д. Воронина – все параметры достоверны с уровнем значимости 0,1.

Результаты данного эксперимента рассматриваются авторами как предварительные к масштабному исследованию применения педотрансферных функций (ПТФ), позволяющих рассчитывать гидрологические константы и восстанавливать ОГХ из почвенно-гидрологических констант.

Литература

- Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 984. 204 с.
Шейн Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении. Учебник.– М.: «ИП Маракушев А.Б.», 2016, – 377 с.



УДК 631.43+004.65

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВЫ С УЧЕТОМ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРЕЦИЗИОННЫХ НОРМ ОРОШЕНИЯ

Терлеев В.В.^{1,*}, Топаж А.Г.², Дунаева Е.А.³, Гиневский Р.С.¹, Лазарев В.А.¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Бюро Гиперборея», г. Санкт-Петербург, Россия

³Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, г. Симферополь, Россия

* Vitaly_Terleev@mail.ru

MATHEMATICAL MODELLING THE WATER-RETENTION CAPACITY OF SOIL WITH ACCOUNT OF HYSTERESIS FOR CALCULATING THE PRECISION IRRIGATION RATES

Terleev V.V.¹, Topaj A.G.², Dunaieva E.A.³, Ginevsky R.S.¹, Lazarev V.A.¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

²LLC «Bureau Hyperborea», St. Petersburg, Russia

³Federal State Budget Scientific Institution «Research Institute of Agriculture of Crimea»,
Simferopol, Russia

Annotation: The improved Scott-Kosugi and Scott-Haverkamp models are compared to each other, as well as to original Kool-Parker-Van Genuchten model. The comparison is based on the errors of dot-approximation of experimental data on the main branches, as well as the errors in estimating the scanning wetting branches of «Rubicon sandy loam».

Введение

Постановка задачи, решаемой в исследовании, является следующей: разработать метод расчета прецизионных норм орошения сельскохозяйственной культуры, применение которых предотвратит (минимизирует) сток гравитационной влаги за пределы корнеобитаемого слоя, а также понизит риск загрязнения грунтовых (природных) вод агрохимикатами. Решение этой задачи, очевидно, будет иметь большое практическое значение при создании ресурсосберегающих агротехнологий. Целью исследования является верификация предлагаемого метода, разрабатываемого на основе математического моделирования.

Важнейшей предпосылкой достижения этой цели является изучение гидрофизических свойств почвы. Важнейшим из них является водоудерживающая способность почвы. Это свойство формулируется в виде зависимости между величинами объемной влажности почвы θ [см³·см⁻³] и капиллярного давления (капиллярно-сорбционного потенциала) почвенной влаги ψ [см Н₂O]. Наиболее широко применяемым методом лабораторного измерения этой зависимости является метод пневматического пресса. В этом методе избыточным газовым давлением влага вытесняется из почвенного образца, изначально полностью насыщенного водой, попутно фиксируются сопряженные значения θ и ψ . Получаемое таким образом множество точек называется кривой водоудерживающей способности почвы. Как известно, природа данного гидрофизического свойства почвы является гистерезисной, а кривая, построенная по точкам, которые получены методом пневматического пресса, описывает главную ветвь иссушения гистерезиса водоудерживающей способности почвы.

На этой кривой имеется особая точка, которая отмечает границу перехода воды из категории гравитационной в категорию капиллярно-подвешенной влаги. Значение θ , которое



соответствует этой точке, называется наименьшей влагоемкостью (НВ) почвы. Разность между НВ и значением предполивной влажности почвы (ППВ) используется в практикуемой методике расчета норм полива. В качестве минимума вычитаемого значения этой разности принимается влажность разрыва капилляров (ВРК). Для оптимизации условий влагообеспечения сельскохозяйственных растений полив на практике начинается при несколько более высоких значениях ППВ корнеобитаемого слоя почвы. Способна ли почва удержать всю влагу при норме, вычисленной по формуле НВ минус ППВ? Если бы не было гистерезиса $\theta(\psi)$, то ответ был бы положительным. При наличии этого феномена последовательность состояний почвенной влаги в увлажняемой почве описывается ветвью увлажнения, а не ветвью иссушения $\theta(\psi)$. При этом главная ветвь увлажнения и все сканирующие ветви петли гистерезиса располагаются ниже главной ветви иссушения $\theta(\psi)$. Это означает, то при норме, вычисленной по формуле НВ минус ППВ, значение θ достигает НВ, а отрицательное капиллярное давление влаги на некоторое время оказывается больше значения ψ при НВ, которое соответствует главной ветви иссушения $\theta(\psi)$. При этом образуется избыток гравитационной влаги, который стекает за пределы корнеобитаемого слоя почвы. Поэтому при расчете норм орошения следует использовать не НВ, а значение θ на заданной ветви увлажнения, которое соответствует значению ψ при НВ. Почему этот очевидный тезис не учитывается в практике ирригационного земледелия? Ответ состоит в том, что в условиях сельскохозяйственного поля заранее не известно, какие сканирующие ветви увлажнения $\theta(\psi)$ понадобятся для расчета норм орошения. Измерения сканирующих ветвей являются весьма трудоемкими, а измерить все сканирующие ветви практически невозможно. Таким образом, единственным выходом из этого положения является применение математической модели гистерезиса.

Объекты и методы

Во многих публикациях результаты исследований являются развитием двух известных моделей гистерезиса (Гурин, Терлеев, 2011; Терлеев и др., 2013а; Терлеев и др., 2013б). Первая из них – это модель Скотта и соавторов (Scott et al., 1983), вторая – это модель Кула и Паркера (Kool, Parker, 1987). В основу первой модели положена функция $\theta(\psi)$, предложенная Хаверкампом и соавторами (Haverkamp, et al., 1977); в основу второй модели – функция $\theta(\psi)$, предложенная Ван Генухтенем (Van Genuchten, 1980). В данном исследовании предлагается в первой модели использовать усовершенствованные в (Терлеев и др., 2017) функции Косуги (Kosugi, 1994, 1996) и Хаверкампа с соавторами. Далее три модели гистерезиса, в которых используются три функции $\theta(\psi)$ (см. Табл. 1), сравниваются между собой. В основу сравнения положены погрешности точечной аппроксимации опытных данных о главных (граничных) ветвях, а также погрешности оценок сканирующих ветвей увлажнения для гистерезиса $\theta(\psi)$ почвы из каталога Муалема «3501 Rubicon sandy loam» (Mualem, 1976). В Табл. 1 используются следующие обозначения: $erfc(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ – дополнительная функция ошибок; $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ – эффективное влагонасыщение почвы; θ_s [см³·см⁻³] – объемная влажность насыщения почвы; θ_r [см³·см⁻³] – объемная влажность почвы, соответствующая минимальному удельному объему почвенной влаги как жидкости; в функции №1 α [см H₂O⁻¹], n и m – эмпирические параметры ($m = 1 - 1/n$, $n > 1$); в функциях №2 и №3 $n > 0$, $\alpha = -1/(\psi_0 - \psi_e)$ [см H₂O⁻¹], ψ_e [см H₂O], ψ_0 [см H₂O] < ψ_e – интерпретированные параметры (для ветвей иссушения $\psi_e = \psi_{e,d} \leq 0$, для ветвей увлажнения $\psi_e = \psi_{e,w} \geq 0$); при $\psi_e = 0$ функции №2 и №3 соответственно сводятся к моделям водоудерживающей способности почвы Косуги, а также Хаверкампа и соавторов. В моделях



гистерезиса поворотные точки рассчитываются по алгоритму Скотта и соавторов (Scott et al., 1983), который представлен в Табл. 2.

Таблица 1. Функции $\theta(\psi)$, используемые в моделях гистерезиса

| Модель гистерезиса | Обозначение модели | № функции | Функциональное описание |
|--|--------------------|-----------|--|
| Кула и Паркера | Hys-KPVG | 1 | $S_e = \begin{cases} (1 + (-\alpha\psi)^n)^{-m}, & \psi < 0; \\ 1, & \psi \geq 0. \end{cases}$ |
| Скотта и соавторов с усовершенствованной $\theta(\psi)$ Косуги | Hys-SKT | 2 | $S_e = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{n\sqrt{\pi}}{4} \ln(-\alpha(\psi - \psi_e)) \right), & \psi < \psi_e; \\ 1, & \psi \geq \psi_e. \end{cases}$ |
| Скотта и соавторов с усовершенствованной $\theta(\psi)$ Хаверкампа и соавторов | Hys-SHT | 3 | $S_e = \begin{cases} (1 + (-\alpha(\psi - \psi_e))^n)^{-1}, & \psi < \psi_e; \\ 1, & \psi \geq \psi_e. \end{cases}$ |

Таблица 2. Формулы для расчета сканирующих ветвей гистерезиса $\theta(\psi)$ (для ветвей иссушения и увлажнения использованы дополнительные индексы «d» и «w»)

| Сканирующие ветви иссушения, начинающиеся от i -й точки на ветви увлажнения | Сканирующие ветви увлажнения, начинающиеся от j -й точки на ветви иссушения |
|---|---|
| $\begin{cases} \theta = \theta_r + (\theta_s^* - \theta_r)S_{e,d}, \\ \theta_s^* = \theta_s, \psi_{e,w} \leq \psi_i, \psi < \psi_{e,d}; \\ \theta_s^* = \theta_i, \psi_{e,d} \leq \psi_i < \psi_{e,w}, \psi < \psi_{e,d}; \\ \theta_s^* = \frac{\theta_i - \theta_r (1 - S_{e,d}(\psi_i))}{S_{e,d}(\psi_i)}, \psi_i < \psi_{e,d}, \psi \leq \psi_i; \\ \theta = \theta_s, \psi_{e,w} \leq \psi_i, \psi_{e,d} \leq \psi \leq \psi_i; \\ \theta = \theta_i, \psi_{e,d} \leq \psi_i < \psi_{e,w}, \psi_{e,d} \leq \psi \leq \psi_i. \end{cases}$ | $\begin{cases} \theta = \theta_r^* + (\theta_s - \theta_r^*)S_{e,w}, \\ \theta_r^* = \theta_j = \theta_r, \psi_j \ll \psi_{e,d}, \psi_j \leq \psi < \psi_{e,w}; \\ \theta_r^* = \frac{\theta_j - \theta_s S_{e,w}(\psi_j)}{1 - S_{e,w}(\psi_j)}, \psi_j < \psi_{e,d}, \psi_j \leq \psi < \psi_{e,w}; \\ \theta = \theta_s, \psi_j < \psi_{e,d}, \psi_{e,w} \leq \psi; \\ \theta = \theta_j = \theta_s, \psi_{e,d} \leq \psi_j, \psi_j \leq \psi. \end{cases}$ |

Результаты и обсуждение

Параметры функций $\theta(\psi)$, идентифицированные методом точечной аппроксимации опытных данных о главных (граничных) ветвях гистерезиса, приведены в Табл. 3. С использованием этих параметров вычислены достаточно точные оценки сканирующих ветвей увлажнения. Рис. 1 иллюстрирует результат точечной аппроксимации опытных данных о главных (граничных) ветвях, а также результат оценивания сканирующих ветвей увлажнения петли гистерезиса (сплошные кривые) водоудерживающей способности исследуемой почвы с использованием модели Hys-SKT. Точками на рисунке изображены опытные данные. В Табл. 4 приведены погрешности точечной аппроксимации опытных данных о главных (граничных) ветвях, а также погрешности оценок сканирующих ветвей увлажнения гистерезиса водоудерживающей способности исследуемой почвы.



Таблица 3. Параметры функций $\theta(\psi)$ для почвы «3501 Rubicon sandy loam»

| № функ- ции | Параметры | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|
| | θ_r | θ_s | $\psi_{e,d}$ | $\psi_{e,w}$ | α_d | α_w | $n_d = n_w$ |
| 1 | 0.17 | 0.38 | - | - | 0.01 | 0.03 | 3.30 |
| | 0 | 1 | - | - | 36 | 78 | 1 |
| 2 | 0.17 | 0.38 | -29. | 29.9 | 0.01 | 0.01 | 3.42 |
| | 3 | 1 | 17 | 9 | 57 | 53 | 1 |
| 3 | 0.17 | 0.38 | -18. | 26.9 | 0.01 | 0.01 | 3.67 |
| | 5 | 1 | 05 | 9 | 40 | 68 | 9 |

Таблица 4. Погрешности: а) точечной аппроксимации данных о главных (граничных) ветвях и б) оценок сканирующих ветвей увлажнения гистерезиса для почвы «3501 Rubicon sandy loam»

| Модели гистерезиса | Среднее абсолютное отклонение результатов моделирования от опытных данных (Average Absolute Deviation) | |
|-----------------------|--|---|
| | Аппроксимация данных о главных (граничных) ветвях для 74 точек | Оценки сканирующих ветвей увлажнения для 33 точек |
| Hys-KPVG | 0.0130 | 0.0118 |
| Hys-SKT | 0.0069 | 0.0046 |
| Hys-SHT | 0.0084 | 0.0083 |

Объемная влажность почвы
[см³ · см⁻³]

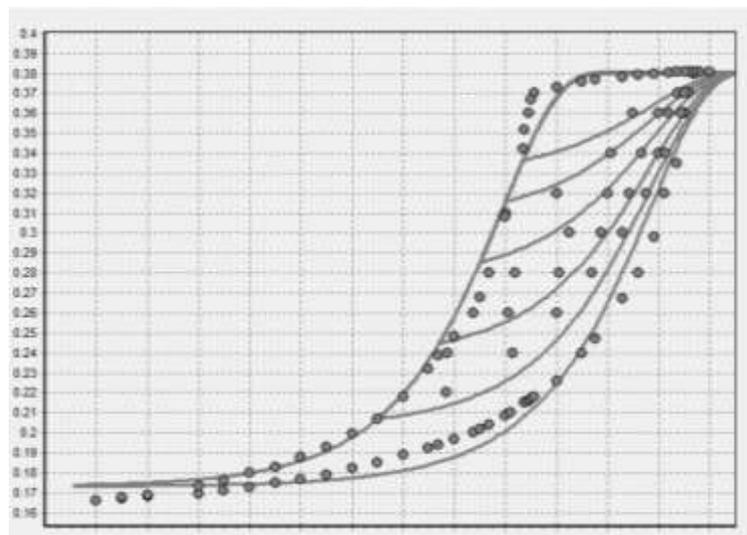


Рис. 1. Точечная аппроксимация опытных данных о главных (граничных) ветвях; оценки пяти сканирующих ветвей гистерезиса водоудерживающей способности почвы «3501 Rubicon sandy loam» с использованием модели Hys-SKT.



Выводы

При аппроксимации данных о главных (граничных ветвях) почвы «3501 Rubicon sandy loam» наименьшее среднее абсолютное отклонение имеет функция №2. Прогноз сканирующих ветвей увлажнения гистерезиса с применением функций №2 и №3 имеет меньшую среднюю абсолютную погрешность по сравнению с результатом, полученным при использовании функции №1. Наиболее точный прогноз получен с использованием функции №2. Следовательно, для решения задачи оценки сканирующих ветвей гистерезиса водоудерживающей способности почвы использование функций №2 и №3 является более предпочтительным. Этот результат, кроме того, оправдывает целесообразность использования дополнительного физически интерпретированного параметра ψ_e . Таким образом, описание гидрофизических свойств почвы при помощи функций №2 и №3 с параметрами, для которых предложена физико-статистическая интерпретация, представляет собой решение проблем, обозначенных в настоящей статье.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-04-00939-а, 19-016-00148-а.

Литература

- Гурин П.Д., Терлеев В.В. (2011) Использование логнормального распределения эффективных радиусов почвенных капилляров для моделирования водоудерживающей способности почвы. *В сборнике: XL Неделя науки СПбГПУ*, 319-321.
- Терлеев В.В., Топаж А.Г., Миршель В., Гурин П.Д. (2013а) Моделирование главных ветвей иссушения и увлажнения петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы. *Агрофизика* **1**, 22-29.
- Терлеев В.В., Топаж А.Г., Гурин П.Д. (2013б) Программа «Hysteresis» для расчета сорбционных и десорбционных ветвей петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы. *В сборнике: Материалы науч. сессии по итогам 2012 года АФИ*, 161-166.
- Терлеев В.В., Миршель В., Баденко В.Л., Гусева И.Ю. (2017) Усовершенствованный метод Муалема-Ван Генухтена и его верификация на примере глинистой почвы Бейт Нетофа. *Почвоведение* **4**, 457-467.
- Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P.J., Vachaud G. (1997) A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **41**, 285-294.
- Kool J.B., Parker J.C. (1987) Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resources Research* **23(1)**, 105-114.
- Kosugi K. (1994) Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research* **30**, 891-901.
- Kosugi K. (1996) Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research* **32**, 2697-2703.
- Mualem Y. (1976) A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. *Research Project 442. Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel*, 100 p.
- Scott P.S., Farquhar G.J., Kouwen N. (1983) Hysteretic effects on net infiltration. *Proceeding of National Conference on Advances in Infiltration. Publication 11-83 (Michigan: St. Joseph American Society of Agricultural Engineers)*, 163-170.
- Van Genuchten M.Th. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**, 892-989.



УДК 631.4

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЛАГОПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛАГОЗАПАСОВ В ЛАНДШАФТЕ

¹Трегубова П.Н., ^{2,3}Владимиров А.В., ²Васильев Т.А., ¹Марахова Н.А., ²Васильева Н.А.

¹Сколковский институт науки и технологий, Центр по научным и инженерным вычислительным технологиям для задач с большими массивами данных, ул. Нобеля, д. 3, д. Сколково

tregubova.polin@gmail.com

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Междисциплинарная лаборатория математического моделирования почвенных систем, Пыжевский пер., д.7, стр. 2, г. Москва

nadezda.vasilyeva@gmail.com

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

CONSIDERATION OF HETEROGENEITY OF INFILTRATION SOIL PROPERTIES IN PREDICTIONS OF WATER STOCK DISTRIBUTION IN THE LANDSCAPE

Annotation: The aim of this study was to simulate water stock distribution using a process-based model of water, vapor and heat transfer to add a prewetting effect in surface runoff calculations to improve simulation of multiple rainfall events. Study is done with a focus on monitoring soil properties easily measured in field and in routinely used in agricultural practice.

Введение

Устойчивое землепользование невозможно без понимания процессов, контролирующих движение влаги в почве. Изучение почвенного гидрологического режима лежит в основе разнонаправленных исследований, посвященных доступности растениям влаги и элементов питания, охране почвенных и водных ресурсов, миграции загрязняющих веществ в ландшафте (Assouline, 2015), (Vereecken et al., 2016), (Aravena, Luckman, 2009), (Tedoldi, 2016). Особенно важен учет совместного влияния почвенных свойств, особенностей топографических характеристик, погодных условий и режима орошения в изучении функционирования сельскохозяйственных территорий.

Процесс инфильтрации является ключевым в почвенном гидрологическом цикле, поскольку он участвует в формировании как поверхностного, так и внутрипочвенного стока (Курс физики почв, 2005), (Ebel, Moody, 2017), (Mirzaee et al., 2013), (Principles of... 2004), определяя то количество влаги, которое может впитаться и, следовательно, быть доступным для корневой зоны растений. В условиях, когда количество поступающей воды превышает скорость инфильтрации почвы, излишек влаги формирует локальные зоны переувлажнения либо стекает в соответствии с рельефом территории. Инфильтрационная способность тесно связана с почвенными характеристиками – содержанием и составом органического вещества, особенностью структуры и гранулометрического состава почвы, плотностью, и их производными, а также с локальными топографическими особенностями.

Целью работы было применить данные о пространственном распределении почвенных свойств – твердости и влажности – для разработки модуля инфильтрации в модели влаго-, газо- и теплопереноса и, с учетом эффекта начальной влажности почвы, моделирования поверхностного стока и влагозапасов при заданной интенсивности осадков.



Объекты и методы

Объектом исследования послужило сельскохозяйственное поле, расположенное в Курской области (51.841548, 37.720852). Почва – чернозём типичный тяжелосуглинистый на двухчленных отложениях – лессовидных суглинках и аллювиальных песках (табл. 1).

Таблица 1. Средние значения и 95 % доверительные интервалы (μ и Conf) кислотных свойств почв, общее содержания углерода и плотность на плакорных участках в пахотном и подпахотном слоях

| Слой | pH (H2O) | pH (KCl) | Гидролитическая кислотность | C, % | ρ_b |
|----------|----------|----------|-----------------------------|---------|----------|
| 0-30 см | 6.4±0.5 | 5.2±0.4 | 5.0±2.2 | 3.5±0.2 | 1.1±0.1 |
| 30-40 см | 6.4±0.2 | 5.1±0.2 | 5.3±0.9 | 3.5±0.5 | 1.2±0.1 |

Для поля была получена цифровая модель рельефа с использованием БПЛА Geoskan и технологии GNSS. В 52 точках регулярной сетки была измерена твердость до глубины 80 см в 10-кратной повторности пенетрологом Eijkelkamp и влажность послойно с шагом 10 см гравиметрически. На участках, соответствующих характерным позициям рельефа, были заложены разрезы, в которых была измерена инфильтрация методом трубок послойно с шагом 20 см до 1 м.

Модуль инфильтрации и учет начальной влажности почвы

Модуль инфильтрации разрабатывался на основе классических уравнений Ван-Генухтена кривой влагоудержания (1) и модифицированного уравнения Муалема-Ван-Генухтена, описывающего гидравлическую проводимость (2).

$$\theta(\psi) = \frac{\theta_S - \theta_R}{(1 + (-\psi\alpha)^n)^m} + \theta_R \quad (1)$$

$$K(\psi) = K_s(T) \frac{(1 - (-\alpha\psi)^{mn}(1 + (-\alpha\psi)^n)^m)^2}{(1 + (-\alpha\psi)^n)^m L} \quad (2)$$

Параметры (K_s , m , n , L and α), используемые в уравнениях (1) и (2), были получены с помощью полевых данных об инфильтрации решением обратной задачи для 65 кривых инфильтрации (Рис. 1).

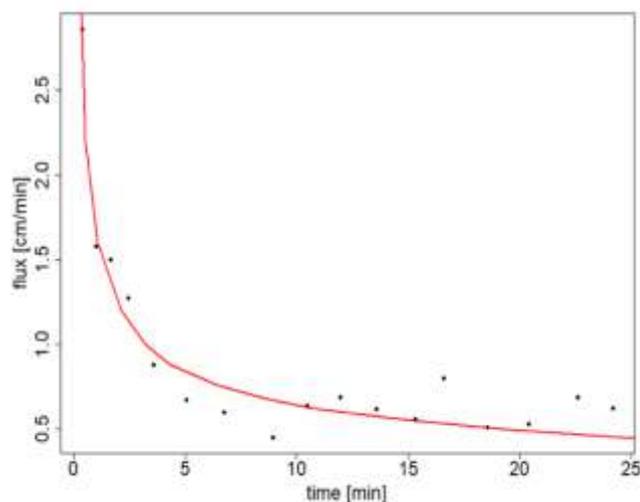


Рис. 1. Кривая инфильтрации: точки – полевые данные, красная линия – смоделированная кривая



Скорость инфильтрации вычисляли как функцию от K_s , начальной влажности и продолжительности дождя, средних за время выпадения осадков.

Результаты и обсуждение

Параметризация коэффициента фильтрации (K_s)

Для коэффициента фильтрации (K_s) была подобрана функциональная зависимость с мониторинговыми свойствами – сопротивлением пенетрации (твердость) и влажностью (рис 2.).

На данном этапе также добавлены данные о соседних полях, на которых точно аналогичным образом, описанном в разделе «Объекты и методы», были измерены инфильтрация, твердость и влажность.

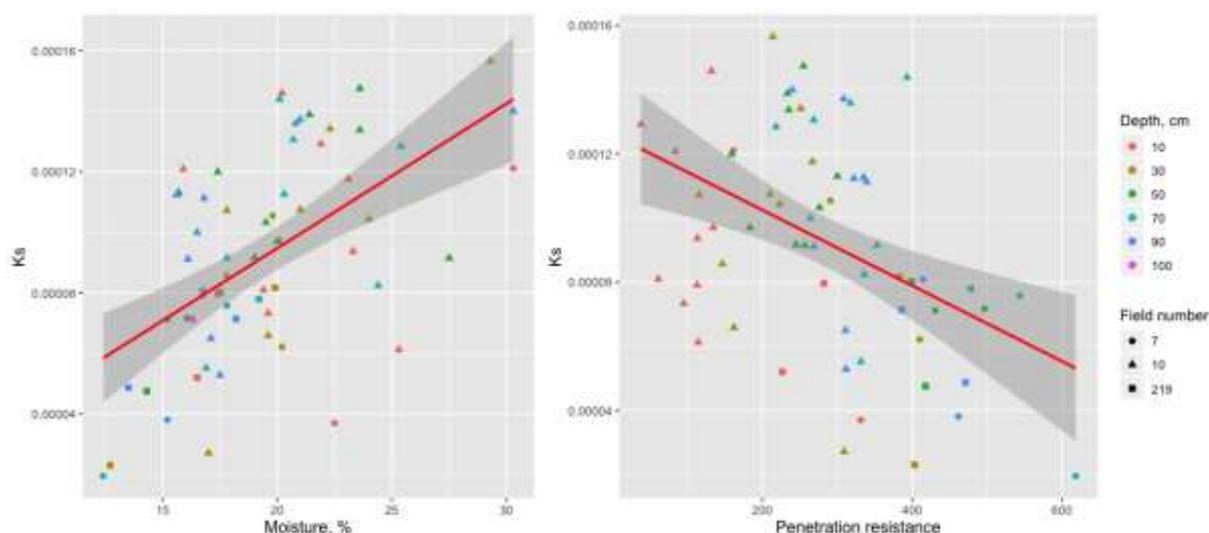


Рис.2. Зависимость K_s от влажности (Moisture, %) и твердости (Penetration resistance, kPa)

В общем виде полученную зависимость можно выразить, как показано в уравнении (3), где $W\%$ - весовая влажность, PR – сопротивление пенетрации.

$$K_s = a(W / PR)^b \quad (3)$$

Исходя из полученной зависимости коэффициент фильтрации был пересчитан для 52 точек регулярной сетки до глубины 80 см с шагом в 10 см соответственно мониторинговым свойствам (рис.3)

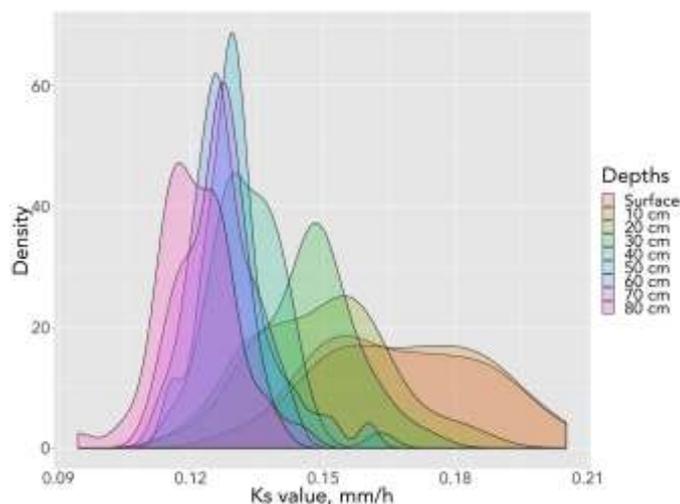


Рис.3. Плотность распределения (Density) расчетного коэффициента фильтрации (K_s) по глубинам (Depths)



Учет эффекта начальной влажности

Расчетный K_s был подан в модуль инфильтрации. Помимо K_s для этого шага были использованы начальная влажность и продолжительность дождя; упомянутые ранее параметры модели m , n , L and α принимались как константные.

Полученные карты K_s и начальной влажности совместно с продолжительностью дождя позволяют вычислить скорость инфильтрации с учетом неоднородности почвенных свойств (рис.4).

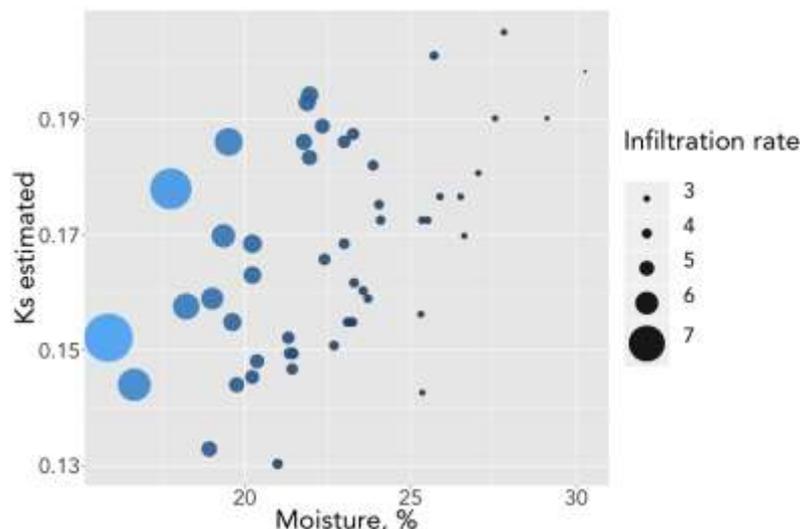


Рис. 4. Расчетная скорость инфильтрации (Infiltration rate), вычисленная как функция на основе коэффициента фильтрации (K_s estimated) и начальной влажности (Moisture, %)

Оценка стока и влагозапасов

Полученный набор данных был использован для оценки поверхностного стока и влагозапасов. Для этого с помощью картографического ПО SAGA GIS из точек регулярной сетки с расчетным в них значением скорости инфильтрации была построена карта инфильтрации в контурах тестового поля ординарным криггингом. Эта карта, совместно с ЦМР поля была использована для моделирования поверхностного стока в GRASS GIS (рис.5).

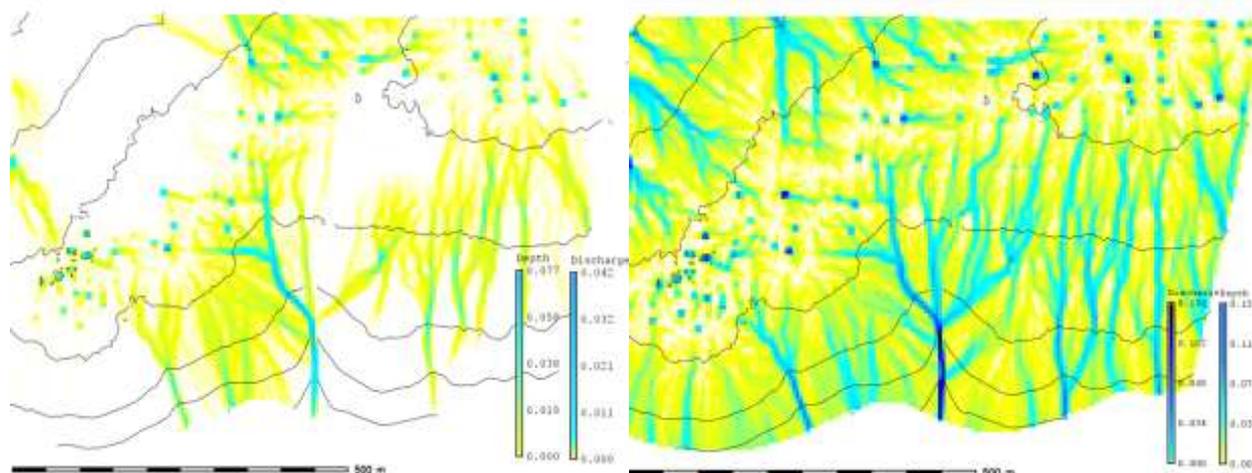


Рис. 5. Направление потоков поверхностного стока и их наполненности при продолжительности дождя средней интенсивности (25 мм/ч) 30 минут (слева) и три часа (справа)



Выводы

Использованный в работе подход, основанный на интегрировании мониторинговых данных, позволяет учесть пространственную неоднородность почвенных свойств, показывает нелинейность распределения потоков влаги в ландшафте при разной интенсивности и продолжительности осадков по сравнению с подходами, использующими данные только о топографической съемке.

Литература

1. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2005. 430 с.
2. Aravena, J. C., & Luckman, B. H. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. *International Journal of Climatology*, 29(14), 2106-2120. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.1761>
3. Assouline, S. (2013). Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, 49(4), 1755-1772. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wrcr.20155>
4. Ebel, B. A., & Moody, J. A. (2017). Synthesis of soil-hydraulic properties and infiltration timescales in wildfire-affected soils. *Hydrological processes*, 31(2), 324-340. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10998>
5. Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M.H., Amelung, W., Aitkenhead, M. and Allison, S.D., 2016. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose zone journal*, 15(5). 1-57. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/pdfs/15/5/vzj2015.09.0131>
6. Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press. <https://www.crcpress.com/Principles-of-Soil-Physics/Lal-Shukla/p/book/9780824753245>
7. Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y. and Gromaire, M.C., 2016. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review. *Science of the Total Environment*, 569. 904-926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716309391>
8. Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyck, M., & Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), 681-693. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03650340.2013.823477>



UDC 532.529+532.583

A NEW MODEL OF MASS TRANSPORT IN CLAYEY SYSTEMS

M.G. Khrumchenkov¹, E.M. Khrumchenkov^{1,2}, R.M. Usmanov¹

¹Kazan Federal University, 420008 Kazan, Kremlevskaya, 18, Russia

²NIISI RAS (Kazan Department) 420111, Kazan, Lobachevskii str., 2/31, Russia

Introduction

In the study and modeling of mass transport processes in clay-containing systems, including some types of soils, it is necessary to take into account the water exchange between bound water and water in transport pores. Bound water has a density other than water in transport pores. This fact has a significant impact on the transport processes in swelling clays and soils. We propose a new approach to the description and experimental verification of this class of phenomena.

Model

A new model of transport processes in deformable shrinking-swelling clayey rocks and soils is proposed. The model is designed for coupled description of rheological and mass transport properties of shrinking-swelling clayey rocks. Model is founded on classical methods of physical-chemical poromechanics and mass exchange theory between water in transport pores and clay minerals in various kinds of clayey rocks. The main advantage of the model is concluded in using of proper storage equation in non-equilibrium mass-exchange processes model (Khrumchenkov *et al*, 2016). Equations of the models are:

The mass balance equation:

$$\operatorname{div} \mathbf{q} + \partial \theta / \partial t = \xi, \quad \xi = \lambda(\theta_{\infty} - \theta)^{\omega}; \quad \lambda, \omega = \text{const} \quad (1)$$

Here θ – dilation, $\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p$, $k = \frac{k_0 m^3}{(1-m)^2}$, $k_0 = \text{const}$ – Darcy law for water flux, k – permeability, m – porosity, μ – viscosity, p – pressure, ξ – shrinkage-swelling function. For θ_{∞} we have $RTq/[V_0(1+\theta_{\infty})-V_s]=W$, where R – gas constant, T – temperature, q – cation exchange capacity, V_0 – initial volume, V_s – volume of solid phase, W – total load.

Equation for connection of dilation and porosity

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (1-m) \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{1-m}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial t}, \quad \frac{1-m}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial t} = \xi \quad (2)$$

Equation for deformation description:

$$\theta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \operatorname{div} \mathbf{U} \quad (3)$$

Rheological correlations:

$$\left(K + \frac{G}{3} \right) (\nabla(\operatorname{div} \mathbf{U})) + G(\Delta \mathbf{U}) = \nabla(p + (\rho_s + \rho_w)gz). \quad (4)$$

Here K , G – elastic coefficients of porous matrix, \mathbf{U} – displacement vector, ρ_s and ρ_w – density of solid phase and water correspondingly.



Features of the model, which are important for explaining of hydro-mechanical and mass transport clay's behavior, were examined. It is shown that in one-dimensional radial flow case the model of flow in swelling clay layer can be reduced to the Fisher–KPP (Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov) equation, and the ratio for the arrival time of the swelling front is

$$R(t) = 2\sqrt{Dt(-\ln U + \lambda t)}, k(K + 4G/3) / \mu = D, 2\pi \int_R^\infty u(r, t) r dr = U \leq 1 \quad (5)$$

The last relation was used for determination of parameters of the process for experimental studies.

Experimental verification

The experiment was carried out in a tray filled with soil with a specially selected content of swelling clay minerals to ensure the smallness of the dilation required by the conditions of the problem (1) - (5). The magnitude of the swelling was recorded by the displacement of the marked soil particles as compared with the initial state. The photograph of the experimental setup is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Experimental setup for measuring the rate of swelling.

The labeled particles were located on the lower vertical line from right to left in the left half of the tray to ensure the same load on the swelling layer. During the experiment, the water entered the tray filled with swelling soil through the gap in the middle of the bottom edge of the tray, ensuring the radial nature of filtration (Fig. 2).



Fig. 2. The stages of impregnation swelling clay layer. Marker lines are shown in red.

The soil particles are at a certain height, tinted in order to observe their displacement during water filtration and swelling. The pressure drop was chosen so as to avoid filtration swelling (buckling). In the course of the experiment, the swelling rate was calculated and its compliance with relations of model (1) – (5) was checked. From the data it can be seen that the deformations front rate at two points coincide in complete agreement with relation (5).

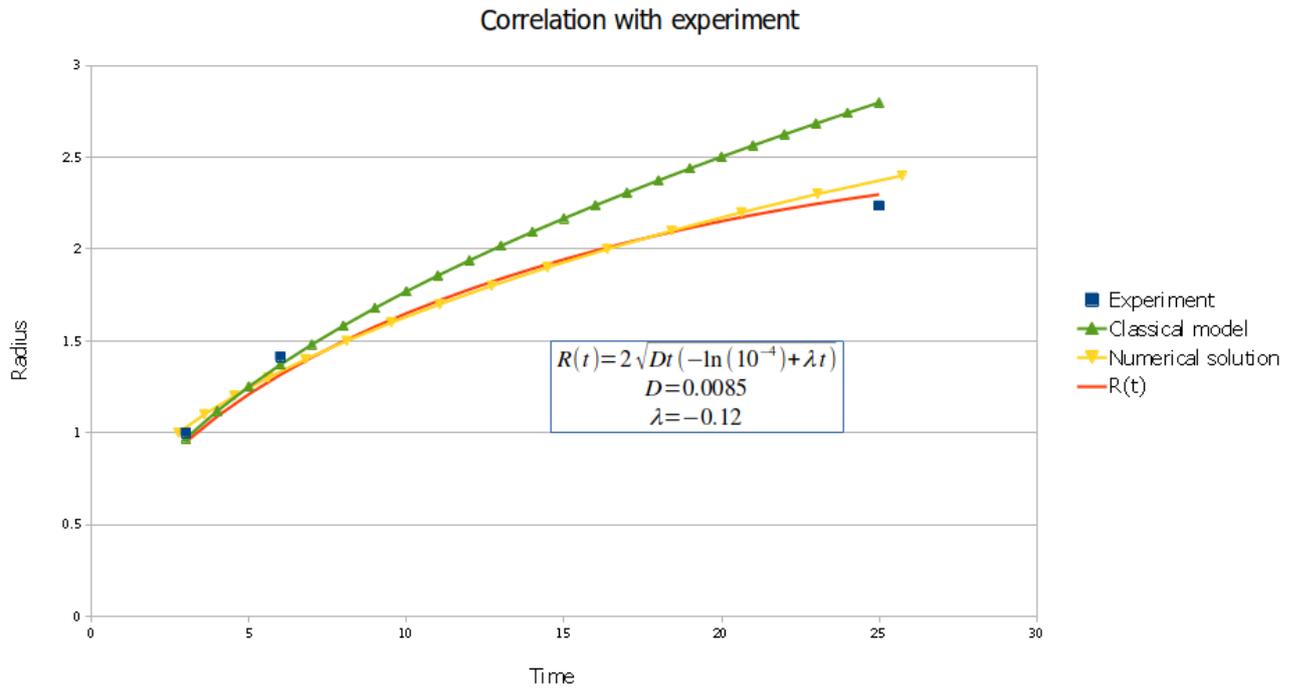


Fig. 3. Comparison of experimental and modeling results. Experiment#1 was performed on Permian and Neogene clays with addition of quartz sand (0,25-0,16).

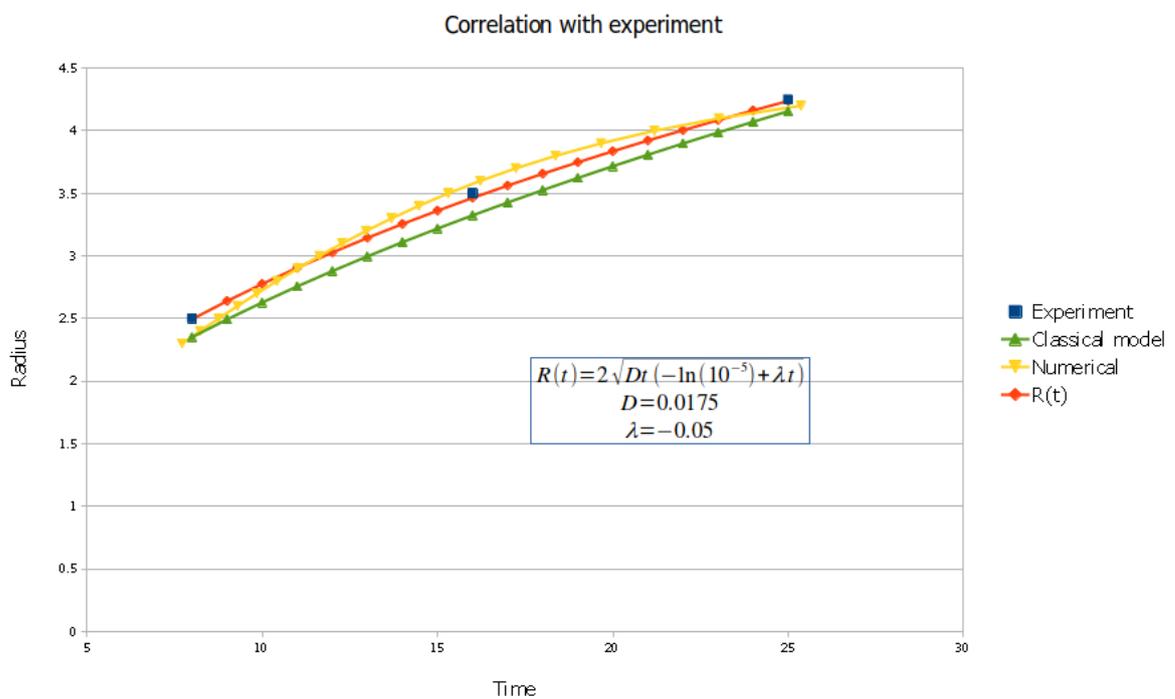


Fig. 4. Comparison of experimental and modeling results. Experiment#1 was performed on Permian clays with addition of quartz sand (0,25-0,16).



One point was located on the axis of symmetry of the tray at a height of 8 mm, the others - at a distance of 10 mm and 25 mm from it at the same height correspondently. The time of formation of the lifting of soil particles to a height of 0,25 mm at each point was measured. Conducted two experiments with two different types of clays. The graph of the distance to the exit flow point from the time of formation of the selected height of swelling is shown in Fig. 3 and 4. It should be noted that under the condition of smallness of the swelling value, it was possible to obtain very good agreement between the experimental data and the results of the theoretical analysis.

Conclusion

The equation obtained in (Khrumchenkov *et al*, 2016) can be used, among other things, to describe the transport processes in swelling porous media when they are wetted with the proviso that their applicability is permissible under conditions of small general deformations as well as swelling deformations. In addition, the obtained equation turns out to be suitable for describing the transformation of some components of the mineral phase of the reservoir during oil production processes using water flooding. In the simplest case for the radially symmetric problem, we obtained the Fisher equation (or the Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov equation), which leads to a simple relation for the velocity of the front of the water exchange reaction, which well explains the experimentally observed features of the process. Experimental studies well confirm the obtained theoretical results.

Khrumchenkov E., Khrumchenkov M. (2016) *Int. J. of Rock Mechanics&Mining Sci.* 86, 1 –4.



СЕКЦИЯ 3. АГРОФИЗИКА, АГРОХИМИЯ И ПОЧВЕННАЯ БИОТА КАК ТРИАДА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ УСЛОВИЙ



THE EFFECT OF *AZOTOBACTER CHROOCOCCUM* INOCULATION TO SOIL ON AGGREGATION

Kızılkaya Rıdvan ^{1,2}

¹ Ondokuz Mayıs University, Faculty of Agriculture, Dept. Soil Science & Plant Nutrition, Turkey
ridvank@omu.edu.tr

² Agrobigen Research & Development Trade Ltd.Co, Samsun Technopark, Samsun, Turkey
ridvan.kizilkaya@agrobigen.com.tr

Abstract. In this study, the effects of different numbers of *Azotobacter chroococcum* RK49 population on aggregate stability were investigated during the different incubation periods at 25 ± 2 °C. Sterilized clay soil samples were inoculated with 0, 2, 4, 6 and 8 ml doses of growth media which included 2×10^9 *A.chroococcum* RK49 per ml. At the end of 35 days incubation periods, aggregate stability percentages of soil samples were determined using wet sieving method. In general, 4 and 6 ml inoculation doses of *A.chroococcum* RK49 significantly increased aggregation between soil particles at $P < 0.01$. Aggregation slowed down after the 21 days incubation. At the end of the 35th day incubation, probably increase in substrate requirements of *A.chroococcum* RK49 and bacterial attack on products which bind soil particles together resulted in disaggregation in the soil samples inoculated with 6 and 8 ml doses.

Key words: Aggregate stability, microorganisms, inoculation, *Azotobacter*.

Introduction

There has been an increased interest in biological nitrogen fixation in the context of sustainable agriculture as a result of cost of mineral fertilizers and their possible harms to the environment. Non-symbiotic nitrogen fixing bacteria that live in the rhizosphere (Dobereiner, 1997) and/or endophytically (Hecht-Buchholz, 1998) often increase yields of cereals and other crops (Kızılkaya, 2008; Durmuş and Kızılkaya, 2016). Many bacterial species were identified to have nitrogen fixing properties including *Azospirillum* sp., *Azotobacter* sp., *Bacillus* sp., *Beijerinckia* sp., *Clostridium* sp., *Enterobacter* sp., *Pseudomonas* sp., etc. (Kennedy and Tchan, 1992)

Biological factors also have a major effect on the development of stable aggregates. The many microbial products such as; polysaccharides, hemiceluloses or uronides, as well as numerous other natural polymers, are attached to clay surfaces by means of cation bridges, hydrogen binding, van der Waals forces and anion adsorption mechanisms. Organic polymers hardly penetrate between the individual clay particles but form a protective capsule around soil aggregates. These organic products may further promote aggregate stability by reducing wettability and swelling (Hillel, 2004). Stability of microaggregates depends on persistent organic binding agents, whereas macroaggregates are stabilized by plant roots and fungal hyphae. Soil organic matter is metabolized by a variety of microorganisms to produce polysaccharides that act to bind soil particles into microaggregates (Oades, 1993, Tisdall and Oades, 1982).

The objective of this study was to determine the effects of different numbers of *A.chroococcum* population on aggregation at the end of the different incubation periods.

Objects and Methods

Soil sample used in this study was taken from 0 to 20 cm soil depth. Air dry soil sample was passed through a sieve 2 mm size opening. Some physico-chemical properties of the soil sample were determined as follows: particle size distribution by the hydrometer method, CaCO_3 content by Scheibler calimeter, pH in 1:2,5 (w/v) soil:dH₂O suspension by pH-meter, Electrical conductivity



(EC) in the same soil suspension by EC-meter, and cation exchange capacity (CEC) according to Bower method. Soil organic matter was measured by Walkley-Black method (Rowell, 1996).

Azotobacter chroococcum RK49 isolate was used as a bacteria strain in this study. This isolate was supplied from the collection of microbiology unit of Soil Science and Plant Nutrition Department of Ondokuz Mayıs University. Soil conditions from which *A. chroococcum* RK49 strain was isolated and N fixing capacities in pure culture were provided in Kızılkaya (2009), impacts of isolate over plant production under greenhouse and field conditions were provided in Kızılkaya (2008), 16S ribosomal RNS results were provided in Kızılkaya et al. (2010). Stock cultures of *A. chroococcum* RK49 strain at -30°C and in 25% glycerol was used augmenting in Ashby media, L^{-1} (glucose 5g, mannitol 5g, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.1 gr, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1g, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5 mg, K_2HPO_4 0.9 g, KH_2PO_4 0.1 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01g, CaCO_3 5g, Agar 15 g, pH 7.3). *A. chroococcum* RK49 strain stored and stock culture at -30°C in 25% (v/v) glycerol was realized under aseptic conditions and 96 hour cultures (2×10^9 CFU/ml) were formed within liquid Ashby media in a shaker incubator ($30^{\circ}\text{C} - 125\text{rpm}$).

20 g soil sample was transferred into each flask and the flasks were taped with cotton and aluminum foil. The flasks including 20g soil samples in each were autoclaved at 121°C for 30 minutes. After 100 mg glucose as a substrate was added to soil sample in each flask, the sterilized soil samples in flasks were inoculated with different numbers of *A. chroococcum* RK49 strain adding 0, 2, 4, 6 and 8 ml doses of liquid Ashby media with three replications. Inoculated soil samples were incubated for 7, 14, 21, 28 and 35 days at $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$. During the incubation periods, soil samples were kept under near the field capacity. At the end of the each incubation period, aggregate stability percentage of the samples were determined using wet sieving method (Kemper and Rosenau, 1986) and placed aside. Soil samples were wet sieved using a sieve with 0.250 mm size opening. An analysis of LSD multiple comparisons test was used to determine the significance of the differences recorded among the *A. chroococcum* RK49 doses and different incubation periods on aggregate stability percentage (Steel and Torrie, 1980).

Results and Discussion

Some physico-chemical properties of the soil used in this study is given in Table 1. Soil analyses results can be summarized as; textural class of soil is clay, soil is moderately alkaline in pH, low in organic matter, very high lime content and non-saline according to EC value.

Table 1. Some physico-chemical properties of the soil

| | |
|---|-------|
| Sand (S), % | 30.06 |
| Silt (Si), % | 29.03 |
| Clay (C),% | 40.90 |
| pH dH_2O (1:2.5) | 8.20 |
| EC $_{250\text{C}}$, dSm^{-1} | 1.80 |
| Organic matter, % | 1.42 |
| CaCO_3 , % | 16.40 |
| CEC, $\text{meq } 100\text{g}^{-1}$ | 38.20 |

The effects of different inoculation number of *A. chroococcum* RK49 on aggregate stability at the end of the incubation periods are given in Table 2. Percent changes in aggregate stability according to average percent aggregation of control (34.74%) were calculated for every inoculation dose and incubation period are also given in Table 2. Aggregation in control applications did not show any significant change statistically during the each incubation period at $P < 0.01$. Effect of



inoculation doses of *A.chroococcum* RK49 strain on aggregation varied for each incubation period. During five different incubation periods, percent changes in aggregation according to control due different number of *A.chroococcum* RK49 strain inoculation are given in Fig.1.

Table 2. Mean aggregate stability (AS) percentages at the end of five different periods and percent changes (PC) in aggregation according to aggregation in control

| Inocu. Doses, ml | Incubation period, days | | | | | | | | | | Mean | |
|------------------------|-------------------------|------|----------------------|------|--------------------|------|---------------------|------|---------------------|------|------|------|
| | 7 | | 14 | | 21 | | 28 | | 35 | | AS,% | PC,% |
| | AS,% | PC,% | AS,% | PS,% | AS,% | PC,% | AS,% | PC,% | AS,% | PS,% | AS,% | PC,% |
| Control | 34.5 ^{Aa} | - | 36.4 ^{Aa} | - | 34.3 | - | 34.1 | - | 34.5 | - | 34.7 | - |
| 2 | 39.2 ^{Bb} | 12.8 | 37.2 ^{ABab} | 7.2 | 42.3 ^{Aa} | 23.0 | 39.8 ^{Aa} | 14.7 | 35.2 ^{Ba} | 1.4 | 38.8 | 11.8 |
| 4 | 42.3 ^{Cc} | 21.7 | 39.2 ^{Bb} | 12.8 | 50.1 ^{Bc} | 44.1 | 34.9 ^{Bb} | 0.4 | 36.0 ^{Ba} | 3.7 | 40.5 | 16.5 |
| 6 | 38.2 ^{Bb} | 9.8 | 42.5 ^{Cc} | 22.2 | 53.9 ^{Cd} | 55.2 | 34.6 ^{Aa} | -0.3 | 33.8 ^{Ba} | -2.9 | 40.6 | 16.8 |
| 8 | 39.2 ^{Bb} | 12.9 | 39.2 ^{Bb} | 12.7 | 42.7 ^{Bc} | 22.9 | 40.2 ^{Bbc} | 15.8 | 31.4 ^{Aba} | -9.7 | 38.5 | 10.9 |
| Mean | 39.7 | 14.3 | 39.5 | 13.7 | 47.4 | 36.3 | 37.4 | 7.6 | 34.1 | -1.9 | | |

Each ml dose includes *A. chroococcum* RK49 strain. *Numbers within a column by different capital letter(s) are significantly different at $P < 0.01$. ** Numbers within a row by different letter(s) are significantly different at $P < 0.01$.

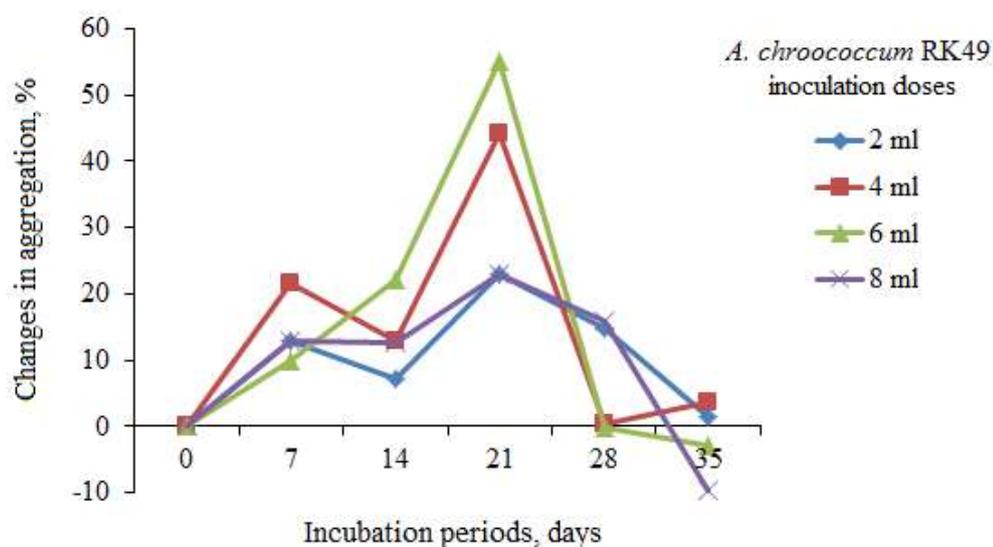


Fig.1. During the different incubation periods, percent changes in aggregation according to control

Aggregation of the samples inoculated with different numbers of *A.chroococcum* RK49 increased during the 21 days. The higher aggregation for each inoculation dose were obtained significantly at the end of 21 days incubation at $P < 0.01$. The highest aggregation was determined for 6 ml dose (53.9%) at 21 days incubation. Also, 4 and 6 ml doses showed higher aggregation at the 7 days (42.3%) and the 14 days (42.5%) incubation respectively. After the first 7 days, these increases in aggregation slowed down during 28 and 35 days incubation. Aggregate stabilities of all the incubation doses decreased at the end of 35 days incubation period. Disaggregation or negative percent changes in aggregation according to control were obtained for 6 ml (-2.9%) and 8 ml (-9.7%) of inoculation doses at the 35 days incubation.



In order to see the effects of inoculation of soil with *A.chroococcum* RK49 on aggregation, percent change in mean aggregate stability of each inoculation dose was calculated according to aggregation in control, regardless of the incubation period differences (Table 2). The effect of inoculation doses on aggregation was found significantly higher for 4 and 6 ml doses than for 2 and 8 ml doses at $P<0.01$. Bacterial activity for aggregation was not enough in inoculation of 2 ml dose due to less binding products by bacterial activity. On the other hand, substance materials in soil were enough to bacterial activity of 4 and 6 ml doses to produce aggregation products between aggregates. However, 8 ml inoculation dose showed a decrease in aggregation. Increasing the number of total bacteria in soil probably decreased aggregation due to more substrate requirements of the bacteria. Because *A.chroococcum* RK49 in soil did not produce enough binding agents between aggregates and probably attacked on some other previous produced products between soil particles.

The rapid recovery of microbial biomass indicated that carbon and energy requirements of soil microorganisms were mainly provided by fresh organic matter (Insam and Domsch, 1998). Powlson et al (2001) and Liu et al (2016) found that aggregation was highly correlated soil organic matter. Microbial extracellular products such as polisaccharides and poliuronics due to high carbon content can be important factors affecting soil aggregation in soil.

Regardless of difference in *A. chroococcum* RK49 strain inoculation doses, percent change in mean aggregate stability for each incubation period was estimated according to aggregation in control (Table 2). Percent changes in mean aggregation were plotted versus incubation periods. The highest aggregation was obtained at 21 days incubation period. After 21 days incubation, aggregation in soil particles slowed down. Aggregation due to *A. chroococcum* RK49 activity of 28 days was found less than aggregation of the 21 days. At the end of the 35 days incubation, disaggregation occurred in soil when compared with aggregation of control samples. It may be explained with that consumption of natural binding agents by total bacteria increased with increasing the number of total bacteria after 28 days incubation. The similar results were obtained in the study about the effects of inoculation of soil with different numbers of bacteria on aggregation by Aşkın et al (2000). They also found that increase in aggregation by total bacteria slowed down during the four weeks of incubation. Incubation effect on aggregation also varied for inoculation doses and carbon source in soil. Allison (1947) determined that higher permeability was related with improved aggregation by microorganisms. The lower permeability was due in part to disintegration of soil aggregates. The dispersion was occurred due to attack of microorganisms on the organic materials which bind soil into aggregates. As a result, 4 and 6 ml inoculation doses generally increased aggregation in soil probably due to some bacterial products which bind soil particles together. Aggregation in soil slowed down after 21 days incubation. At the end of the 35 days incubation, disaggregation occurred most probably due to increase in substrate requirement of *A. chroococcum* RK49 population.

Conclusions

The inoculation of soil with *A. chroococcum* RK49 to improve soil structure may be recommended. If energy materials for *A. chroococcum* RK49 requirements are added to the soil, These inoculation may be effective.

References

- Allison, I.E., 1947. Effect of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Science* 63: 439-450.
- Aşkın, T., Gülser, C., Kızılkaya, R., Özdemir, N., 2000. The effects of inoculation of soil with different numbers of bacteria on aggregation. *International Symposium on Desertification*. June 13-17, 2000. Konya, Turkey. Book of Proceedings. pp. 242-246.



- Dobereiner, J., 1997. Biological nitrogen fixation in the tropics: Social and economic contributions. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 771-774.
- Durmuş, M., Kızılkaya, R., 2016. Effects of *Azotobacter chroococcum* inoculation with different organic wastes on yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Scientific and Research Content "Baitursynov Readings 2016"*. April 15, 2016, Kostanay, Kazakhstan. Book of Proceedings, Vol.3, p.288-292.
- Hecht-Buchholz, C., 1998. The apoplast-habitat of endophytic dinitrogen-fixing bacteria and their significance for the nitrogen nutrition of nonleguminous plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 161: 509-520.
- Hillel, D., 2004. Introduction to environmental soil physics. Elsevier Science. 494p.
- Insam, H., Domsch, K.H., 1998. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology* 15(2): 177-188.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Klute, A., (Ed.). Agronomy Monograph No.9, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. pp. 425-442.
- Kennedy, I.R. and Y.T. Tchan, 1992. Biological nitrogen fixation in non-leguminous field crops: Recent advances. *Plant and Soil* 141: 93-118.
- Kızılkaya R., 2008. Yield response and nitrogen concentrations of spring wheat (*Triticum aestivum*) inoculated with *Azotobacter chroococcum* strains. *Ecological Engineering* 33(2), 150-156.
- Kızılkaya, R., 2009. Nitrogen fixation capacity of *Azotobacter* spp. strains isolated from soils in different ecosystems and relationship between them and the microbiological properties of soils. *Journal of Environmental Biology* 30(1), 73-82.
- Kızılkaya, R., Sazak, A., Şahin, N., 2010. Isolation, characterisation and identification of native *Azotobacter* spp. strains. *International Soil Science Congress on Management of Natural Resources to Sustain Soil Health and Quality*. May 26-28, 2010. Samsun, Turkey. Book of Proceedings, pp. 202-205.
- Liu, Y., Wang, P., Ding, Y., Lu, H., Li, L., Cheng, K., Zheng, J., Filley, T., Zhang, X., Zheng, J., Pan, G., 2016. Microbial activity promoted with organic carbon accumulation in macroaggregates of paddy soils under long-term rice cultivation. *Biogeosciences*, 13, 6565–6586.
- Oades, J.M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Powlson, D.S., Hirsch, P.R., Brookes, P.C., 2001. The role of soil microorganisms in soil organic matter conservation in the tropics *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 41–51.
- Rowell, D., 1994. *Soil science: Methods and applications*. Longman Limited. England. 350p.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H., 1980. *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach*. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York. USA. 663p.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic carbon and water stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science* 33(2): 141-163.



SOME BIO-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SODIC VERTISOLS IN BAFRA PLAIN, TURKEY

Kızılkaya Rıdvan^{1,2}, Dengiz Orhan¹, Gülser Coskun¹

¹ Ondokuz Mayıs University, Faculty of Agriculture, Dept. Soil Science & Plant Nutrition, Turkey
ridvank@omu.edu.tr

² Agrobigen Research & Development Trade Ltd.Co, Samsun Technopark, Samsun, Turkey
ridvan.kizilkaya@agrobigen.com.tr

Abstract. In this study, some bio-physico-chemical characteristics and classification of vertisols that were formed on alluvial delta plain were investigated. Those soils formed on the Bafra Plain found in the Kızılırmak Delta and located in the central Black Sea region of Turkey. Three soil profiles were studied and classified as Vertisols characterised by a dark colour in surface soil, a heavy clayey texture, hardpan formation under top soil (high bulk density- a high compacity). In addition, they have deep wide-opened desiccation cracks at the surface, slickensides at the middle part of the profiles and a poor differentiation of their horizons. Physico-chemically, the studied soils are slightly alkaline to strong alkaline (due to high ESP value), non-saline and poor in organic matter, which is slightly higher in the surface horizon. In addition, cation exchange capacity, sum of exchangeable bases and base saturation of soils are very high. Moreover, soil microbiological properties such as microbial biomass carbon, Basal soil respiration, metabolic quotient (qCO_2), The microbial biomass C to total organic C ratio, catalase and dehydrogenase activity in soils decreased from the surface soil downwards indicating that the major part of location is existed to the A horizon.

Key words: Sodic soils, vertisol, microbiological properties, microorganisms.

Introduction

The name of vertisol is derived from Latin “vertere” meaning to invert, thus limiting the development of classical soil horizons. These soils have the capacity to swell and shrink, inducing cracks in the upper parts of the soil and distinctive soil structure throughout the soil (Ahmad and Mermut, 1996). The formation of these specific features are caused by a heavy texture, a dominance of swelling clay in the fine fraction and marked changes in moisture content (Hubble, 1984). The swell-shrink behavior is attributed to the wetting and drying of the soil mass. Yakupoğlu et al (2010) studied the morphological characteristics of two Vertisols developed in the Çarşamba and Bafra plains of the Black Sea region of northern Turkey. They classified the soils of the Çarşamba plain as Chromic Endoaquerts and Typic Haplusterts and Chromic and Eutric Vertisols according to the Soil Taxonomy and WRB/FAO respectively.

Soil biology is a significant component of soil quality and microorganisms play vital roles in soil fertility and primary production through organic matter decomposition and nutrient cycling. Thus, it is meaningful to evaluate the biological aspects of soil quality within the context of overall system function. Soils contain a large variety of microbial populations with a wide diversity of metabolic activities, some of which have been used for economic purposes (e.g. antibiotic production) (Kızılkaya et al., 2004). Individual physico-chemical factors (e.g., pH, organic carbon, clay content and structure, aggregate stability), biological factors (e.g., populations, positive and negative interactions between organisms) and pollutants influence the behavior of microorganisms in soil. Several microbiological parameters have been used to define the status and sustainable development of soil productivity in agricultural ecosystems (Kızılkaya and Bayraklı, 2005). There are many methods currently available for studying the microorganisms and their activities at the microhabitat level. The dependence of the microbiological properties of agricultural soils on site and soil factors has been studied. Some soil microbiological properties, such as enzyme activities, respiratory activity and microbial biomass are used as bio-indicators for soil quality and health in environmental soil monitoring (Kızılkaya et al., 2004). The aim of this study were to determine some



bio-physical characteristics using with soil microbiological properties in sodic vertisols of Bafra plain, Turkey.

Objects and methods

The objective of this study was to investigate some bio-physical characteristics of sodic vertisols in formed on alluvial in Bafra plain. This study was carried out in the Bafra and Çarşamba Plains found in the Kızılırmak and Yeşilirmak deltas located in the central Black Sea region of Turkey. The Bafra plain is far 30 km from north of the Samsun province and Çarşamba plain is far 50 from east of the Samsun province. The current climate in the both of the study area is semi-humid. The mean annual temperature, rainfall and evaporation are 13.6 °C, 764.3 mm and 726.7 mm respectively in Bafra plain while, the mean annual temperature, rainfall and evaporation are 14.3 °C, 1045.2 mm and 739.1 mm respectively in Çarşamba plain. These areas are mainly flat and slightly sloped (0-2.0 %). Vertisols are important agricultural soils in left side of Bafra Delta Plain. Soils are mostly used for rice cultivation.

Three vertisol profiles formed on deltaic deposits were selected for this study in left side of Bafra delta plains. Morphological properties of these four soil profiles in the field were identified and sampled by genetic horizons. Nineteen soil samples were taken to investigate for their physical and chemical properties at the laboratory. Disturbed soil samples were dried under atmospheric condition and passed through a 2 mm sieve to prepare for laboratory analysis. In soil samples, particle size distribution was determined by the hydrometer method. Particle size distribution by the hydrometer method, CaCO₃ content by Scheibler calsimeter, pH in 1:2,5 (w/v) soil:dH₂O suspension by pH-meter, Electrical conductivity (EC) in the same soil suspension by EC-meter, exchangeable cations and cation exchange capacities (CEC) were measured using a 1 N NH₄OAc (pH 7) extraction method. All soil samples were sieved through a 150 µm mesh before determining the total organic carbon content by the wet oxidation method (Walkley–Black) with K₂Cr₂O₇ (Rowell, 1996).

Microbial biomass carbon (C_{mic}) was determined by the substrate-induced respiration method. Basal soil respiration (BSR) at field capacity (CO₂ production at 22 °C without addition of glucose) was measured by Isermayer method. Dehydrogenase activity (DHA) was determined according to Thalmann method. Catalase activity (CA) was measured by the volumetric Beck method. The microbial biomass C to total organic C ratio (C_{mic}/C_{org}) and metabolic quotient (qCO₂), calculated by dividing the CO₂-C released from the sample in 1 h by the biomass C content (Alef and Nannipieri, 1995). All determinations of microbiological properties were performed for each soil sample in triplicate, and all values reported are averages of the three determinations expressed on an oven-dried sample basis at 105⁰C for 48 h.

Results and discussion

Vertisols are generally found on sedimentary plains as the result of thousands of years eroding the clay content out of the surrounding hills. They can also be found on level land and in depressions. Jenny (1980) also reported that vertisols are typically developed on alluvial material in flat inland areas. The pedons selected for the present study, it was found significantly variation in pH values among all the soil layers. The pH values varied from 7.84 to 9.39 (Table 1). The increase in pH with depth of pedons is a characteristic feature of all pedons and could imply the proximity of the horizons to the alluvial parent material that is rich in alkaline earth cations and water table fluctuation due to sea effect that includes high sodium ion concentration. In parallel, increasing of sodium concentration with depth caused increasing of ESP values in all pedons. The organic matter values varied from 3.2% to 4.8% in surface horizons whereas, these ratios decreased with depth and varied from 0.5% to %2.5. The higher organic matter at the surface could be linked to the continuous



addition of crop residues on the surface of cropped fields in the area. The cation exchange capacity for all the studied soils ranged between 32.6 and 80.7 cmol kg⁻¹ of soils. It increased regularly with profile depth. Calcium and magnesium were the dominant exchangeable cations, with contents ranging between 25.6 and 73.5 cmol kg⁻¹ of soils. It was followed by sodium (3.0 to 12.2 cmol kg⁻¹), while potassium showed more modest values (0.6 to 1.0 cmol kg⁻¹). The CaCO₃ content of the soils increased with depth and values varied from 1.4 % to 34.7 %. The highest values were observed at the subsurface horizons in Profile III due to calcium carbonate leaching and accumulation process. The clay content of all studied pedons varies from 52.2% to 85.7% except for C horizons of pedons while, sand content changes between 5.3%-17.6% in pedogenetic horizons.

Table 1. Some physico-chemical properties of profiles

| Horizon | Depth (cm) | Texture * (%) | | | pH | EC | CaCO ₃ * | O.M* | CEC** | ESP* | Exc. Cations** | | |
|---|------------|---------------|-------|-------|------|------|---------------------|------|-------|-------|-----------------|----------------|--------|
| | | Clay | Silt | Sand | | | | | | | Na ⁺ | K ⁺ | Ca+ Mg |
| Pedon I- Coordinate: North: 4616083m - East: 737858m (UTM) (<i>Sodic Haplustert / Sodic Vertisol</i>) | | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 0-18 | 68,10 | 24,20 | 7,80 | 7,89 | 0,88 | 9.10 | 3,90 | 64,20 | 4,70 | 3,00 | 0,90 | 62,10 |
| Bss1 | 18-45 | 66,00 | 23,40 | 10,60 | 8,39 | 0,51 | 13.40 | 2,30 | 60,60 | 5,90 | 3,60 | 0,80 | 57,60 |
| Bss2 | 45-70 | 65,10 | 21,80 | 13,00 | 8,60 | 0,73 | 12.50 | 1,80 | 56,30 | 8,20 | 4,60 | 0,80 | 52,50 |
| Bss3 | 70-116 | 79,40 | 13,20 | 7,40 | 9,04 | 0,45 | 9.10 | 1,60 | 59,80 | 14,20 | 8,50 | 0,90 | 52,70 |
| C | 116+ | 72,90 | 13,70 | 13,50 | 9,15 | 0,70 | 12.40 | 1,10 | 53,50 | 17,40 | 9,30 | 0,90 | 46,00 |
| Pedon II- Coordinate: North: 4617456m - East: 736809m (UTM) (<i>Sodic Haplustert / Sodic Vertisol</i>) | | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 0-15 | 79,70 | 13,30 | 7,00 | 7,84 | 1,36 | 11.60 | 4,60 | 80,70 | 7,20 | 5,80 | 1,00 | 72,80 |
| Ad | 15-44 | 80,40 | 9,10 | 10,50 | 8,49 | 1,25 | 13.70 | 2,40 | 73,90 | 12,30 | 9,10 | 0,80 | 70,40 |
| Bss ₁ | 44-73 | 55,10 | 29,40 | 15,40 | 8,97 | 1,24 | 14.10 | 2,00 | 54,20 | 17,90 | 9,70 | 0,80 | 50,80 |
| Bss ₂ | 73-108 | 52,20 | 34,90 | 13,00 | 9,07 | 0,68 | 11.00 | 1,70 | 58,00 | 15,00 | 8,70 | 0,70 | 53,20 |
| C | 108+ | 40,50 | 10,70 | 48,80 | 8,94 | 0,82 | 21.60 | 1,30 | 56,00 | 16,80 | 9,40 | 0,70 | 50,10 |
| Pedon III- Coordinate: North: 4618055m - East: 736735m (UTM) (<i>Sodic Calcicustert / Sodic Vertisol</i>) | | | | | | | | | | | | | |
| Ap | 0-18 | 80,50 | 11,00 | 8,50 | 7,92 | 1,15 | 11.70 | 4,80 | 78,70 | 9,00 | 7,10 | 1,00 | 73,50 |
| Ad | 18-50 | 85,70 | 9,00 | 5,30 | 8,78 | 0,36 | 15.00 | 2,30 | 71,00 | 13,00 | 9,20 | 0,80 | 67,80 |
| Bss | 50-82 | 80,10 | 2,30 | 17,60 | 8,89 | 0,71 | 10.90 | 1,90 | 63,60 | 18,20 | 11,60 | 0,90 | 58,30 |
| Bssk | 82-125 | 62,50 | 25,90 | 11,60 | 9,22 | 0,54 | 28.30 | 1,90 | 62,80 | 19,40 | 12,20 | 0,80 | 56,40 |
| C | 125+ | 23,50 | 53,60 | 22,90 | 8,26 | 2,92 | 6.70 | 0,90 | 32,60 | 30,10 | 9,80 | 0,60 | 25,60 |

EC: Electrical conductivity, CEC: Cation exchange capacity, O.M: Organic matter, ESP: Exchangeable sodium percentage. * unit is %, ** unit is cmol kg⁻¹

Vertisols are important agricultural soils in left side of Bafra Delta Plain. However, vertisols are difficult to work, they are of very hard consistence when dry and very plastic and sticky when wet. Therefore, the workability of the soil is often limited to very short periods of medium (optimal) water status. Vertisols are imperfectly to poorly drained, leaching of soluble weathering products is limited, the contents of available sodium, calcium and magnesium are high and the pH is usually above 7.5. Once they have reached their field capacity, practically no water movement occurs, this is due to the very low hydraulic conductivity of a vertisol. In addition, flooding leading to crop damage can be a major problem in areas with higher rainfall.

Soil microbiological properties are presented in Fig. 1 for each profiles. There were significant differences in soil depth. For all soil profile of sodic vertisol, soil microbiological properties such as Cmic, BSR, qCO₂, Corg:Cmic, catalase and dehydrogenase activity in soils decreased from the



surface soil downwards indicating that the major part of location is existed to the A horizon. This situation may be based on soil organic matter deposition in surface horizons (Table 1). The same results were found by Berstrom et al (1998). They suggested that higher proportion of organic matter and microbiological properties in A horizon in a Hapludalf. Dengiz et al (2007) indicated that higher organic matter and soil microbiological properties higher 0-10 deep soil and decreased with soil depth. Because of in organic matter contents, it was assumed that organic C and nutrient content might be affecting microbiological properties of soils. Define positive relationships between soil microbiological properties and organic matter content in soil profiles have also found Aşkın and Kızılkaya (2006) and Kızılkaya et al (2007).

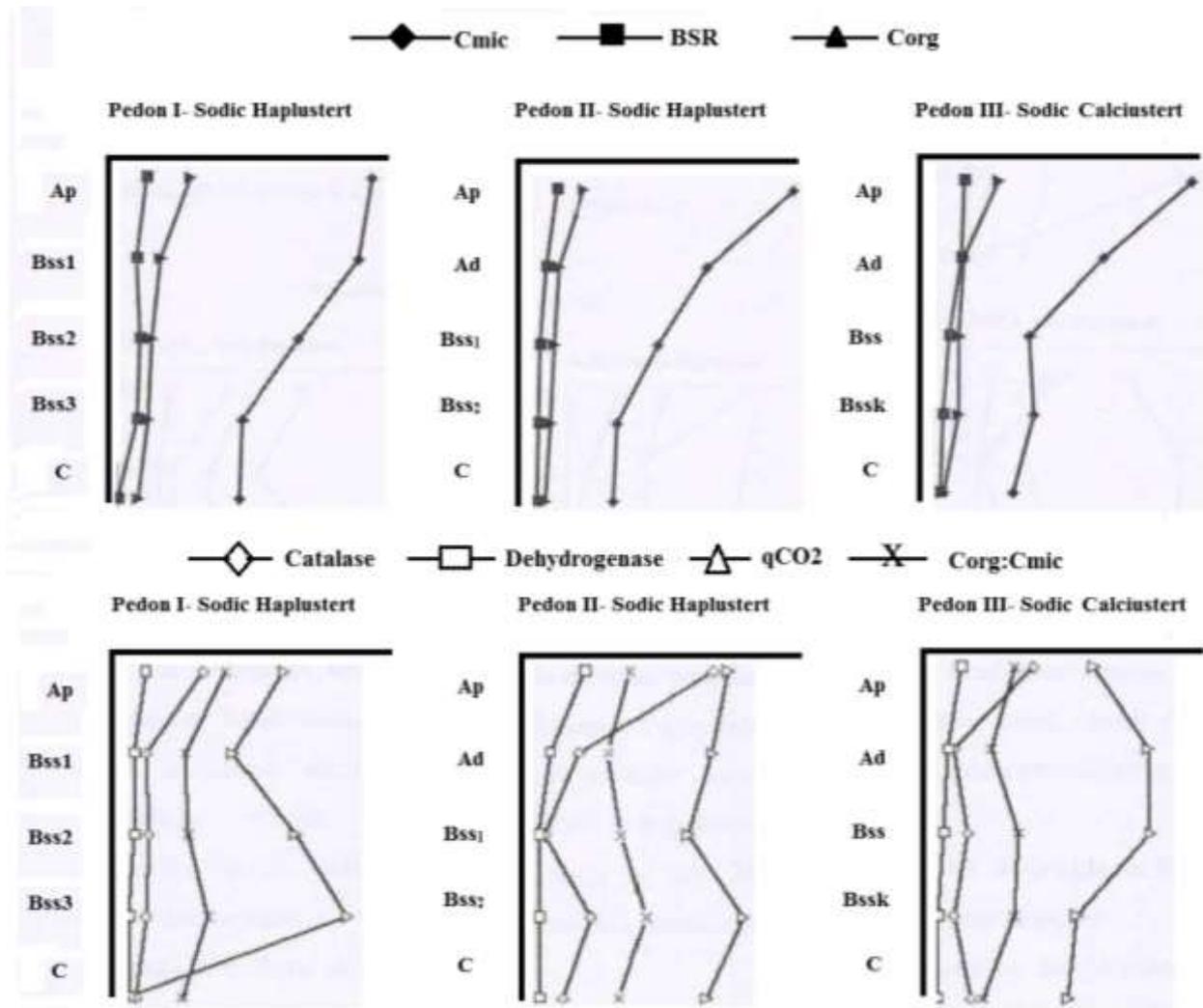


Fig.1. Soil microbiological properties

Conclusions

In this study, it was aimed at investigating the some biological, physical and chemical characteristics of vertisols formed on fluvial land in Bafra Deltaic Plain, in order to highlight their particularities as well as to envisage their practical uses and management. From the morphological and physical point of view, the vertisols of the Bafra Deltaic Plain region are characterised by a dark colour, a heavy clayey texture, hardpan formation under top soil (high bulk density- a high capacity), deep wide-opened desiccation cracks at the surface, slickensides at the middle part of the profiles and a poor differentiation of their horizons. Physico-chemically, the studied soils are from slightly



to strong alkaline (due to high Na ion concentration and ESP value) and poor in organic matter, which is slightly higher in the surface horizon. The results clearly indicated that changes of soil organic matter can alter the soil microbiological properties within the soil profile of sodic vertisol. For this reason, addition of organic materials will be improving soil microbiological activities to organic matter turnover and soil sustainability in sodic vertisols of Bafra delta plain, Turkey.

References

- Ahmad, N. Mermut, A., 1996. Vertisols and Technologies for Their Management. Elsevier, New York, 549p
- Alef, K., Nannipieri, P., 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press. 576p.
- Aşkın, T., Kızılkaya, R., 2006. Organic and microbial biomass carbon contents of aggregates in a toposequence of pasture soil. *Asian Journal of Chemistry* 18(2), 1500-1508.
- Bergstrom, D.W., Monreal, C.M., Millette, J.A., King, D.J., 1998. Spatial dependence of soil enzyme activities along a slope. *Soil Science Society America Journal* 62 (5): 1302-1308.
- Dengiz, O., Kızılkaya, R., Göl, C., Hepşen, Ş., 2007. Effects of different topographic positions on soil properties and soil enzymes activities. *Asian Journal of Chemistry* 19(3), 2295-2306.
- Hubble, G.D, 1984. The cracking clay soils, definition, distribution, nature, genesis and use. In: The properties and utilization of cracking clay soils. *Reviews in Rural Science* No. 5. McGarity, J.W., Hault, E.H., So, H.B. (Eds.). University of New England Armidale, Australia. pp.3-13.
- Jenny, H, 1980. *The Soil Resource*. Springer, New York. 377p.
- Kızılkaya, R., Bayraklı, B., 2005. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology* 30(3), 192-202.
- Kızılkaya, R., Dengiz, O., Hepşen, Ş., Başkan, O., 2007. β -Glucosidase enzyme activity and its relationships with physico-chemical properties in Çatalkaya basin, Ankara. Ninth Baku International Congress, Energy, Ecology, Economy. June 7-9, 2007. Baku, Azerbaijan. Book of Proceedings. pp. 54-58.
- Kızılkaya, R., Aşkın, T., Bayraklı, B., Sağlam, M., 2004. Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals. *European Journal of Soil Biology* 40(2), 95-102.
- Rowell, D., 1994. *Soil science: Methods and applications*. Longman Limited. England. 350p.
- Yakupoglu, T., Sarıoglu, F.E., Dengiz, O., 2010. Morphology, physico-chemical characteristics and classification of two vertisols in Bafra and Carsamba delta plains. *Anadolu Journal of Agricultural Science* 25: 67-73.



RHIZOSPHERE AND NON-RHIZOSPHERE SOIL STRUCTURE DEVELOPMENT UNDER PHOSPHORUS FERTILIZATION APPLICATION

Ibrahim Ortas, Barış Bulutekin and Feyzullah Öztürk

Department of Soil Science, University of Çukurova, Faculty of Agriculture, Adana, Turkey,
iortas@cu.edu.tr

Abstract. Phosphorus fertilizer is among major contributors to the production of aboveground and belowground biomass. Belowground biomass is the main source of soil organic carbon. Organic carbon, plant root and mycorrhizae hyphae are the main factors making the aggregates. Soil aggregate fractions such as water-stable aggregates (WSA) and the mean weight diameter (MWD) are very important soil physical parameters. The objective of this study was to evaluate the effects of long term P fertilizer in development of rhizosphere and non-rhizosphere soil structure. Since 1998, under field conditions, the experiment is conducted to determine the role of P fertilization on several soils and plant quality parameters including soil aggregate development. After harvesting, rhizosphere and non-rhizosphere soil aggregate fractions were determined. Under field conditions, it has been found that there was a general trend of decrease in WSA and MWD in both rhizosphere and non-rhizosphere soil with an increase in the application of P fertilizer levels. surface soil (0-15 cm) have higher MWD and WSA than in that of 15-30 cm soil depth. Generally, the aggregate diameter is in between 1 to 2 mm. While in the rhizosphere soil, there is a better aggregate development than under non-rhizosphere soil. The results of long term P fertilizer application have shown the significance of the appropriately P level fertilizer and wheat and corn rotation treatments have an aggregate development, which stands for sustainable agriculture and food security.

Keywords: Phosphorus fertilization, rhizosphere, Mean Weight Diameter, Water-Stable Aggregates

Introduction

Since the last two-century human population increased rapidly, in order to squares the food security chemical fertilizers, pesticides, tillage and irrigation use has increased agricultural production. At the same time with increasing agricultural inputs the yield increased has been the cause of the decline of soil quality mainly soil physical, chemical and biological quality. The soil quality decline is caused by decreasing soil organic carbon content. In the Eastern part of the Mediterranean regions, since high temperature, high CaCO₃ content and heavy tillage, the soil organic matter content decreases and crop biomass productivity and consequently soil organic matter is low. Under semi-arid soil conditions because of high temperatures and mismanagement of the land use, namely excess tillage, chemical fertilizer, irrigation and burning of straw after harvesting for the next crop, caused the repeat degradation and mineralization of soil organic carbon (SOC). Excessive chemical fertilizer is caused by the degradation of the physical and biological quality of the soils.

Soil and crop management may affect many soil properties, such as enhancing the soil organic carbon (SOC) pool, the development of the soil structure. It is also important to manage soil organic carbon and indigenous soil microorganisms such as mycorrhizal fungi which is a powerful tool to fix more CO₂ from atmosphere to soil through plant leaves and roots to make the soil more qualitative. Cabria *et al.* (2005) reported that conventional tillage caused a reduction in macroaggregates and also a decrease in Fe concentration which is associated with organic compounds.

Vegetation also plays a major role in increasing soil organic matter content to improve the physical, chemical, and biological properties of soils via the rhizosphere. Through cover crop, biomass production can be enhanced which is the prime denominator of soil physical fertility. Organic carbon production can sustainability increases the soil microbial dynamics with a consequent increase in the development of soil structure (Ortaş *et al.*, 2017). Cropping systems are



extensively altering the soil structure. The results of (Liu *et al.*, 2019) indicate that plant root and their rhizosphere effects significantly influence soil aggregate formation and stabilization.

Soil Management and the Aggregate Development

Aggregate stability can be used to evaluate the effects of crop and agricultural management. Since soil managements have effects on organic carbon and rhizosphere, indirectly can affect the soil aggregation development. Soil aggregate stability is a very important soil balance in between disruptive forces such as the number of raindrop forces and stabilization for aggregation favour. Water permeability through into the soil profile which is established by aggregation is very important for healthy plants growth. This is very important for air and healthy transportation through a soil profile. Soil aggregate stability mainly has been related to organic matter content (Tisdall and Oades, 1982), soil texture, presence of Ca, Fe and Al sesquioxides (Roth, 1997) plant roots and mycorrhizae hyphae (Tisdall *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2015). Aggregate stability is a very vital resistant factor against the sealing degree during a storm effect.

The soil aggregates encapsulate organic carbon, reducing the rate of OC decomposition (Six *et al.*, 2000; Lal, 2008). In many studies, plant roots and mycorrhizal hyphae can physically protect the soil carbon from microbial decomposition through aggregation (Golchin *et al.*, 1994; Jastrow *et al.*, 1998). Also, organic compounds such as polysaccharides, carbohydrates, lignin and lipids have effects on aggregation. Golchin *et al.* (1994) indicated that soil aggregation plays a dominant and central role in OC sequestration by physically protecting SOC through their incorporation. Soil structural stabilization is related to soil organic matter inputs (Caravaca *et al.*, 2002). According to Mikha *et al.* (2010), there is a direct relationship between aggregation and SOC. Shrestha and Lal (2007) result shows that the aggregate-size distribution and stability are important indicators of soil quality. Rimal and Lal (2009) reported that that soil management practices significantly influence the structural properties of soil aggregates size and stability. Soil tillage disrupts the macro-aggregates and breaks them into micro-aggregates by letting in oxygen and releasing carbon dioxide (Pendell *et al.*, 2007) as a results SOC is minimized. Soil-crop management practice especially the no-till treatment reduces soil losses and increases the C sequestration through aggregate development.

Arbuscular Mycorrhiza Develops Aggregation



Mycorrhizal fungi as soil microorganisms seem to play a predominant effect on aggregates formation because the symbiosis significantly changes the root functioning (Rillig, 2004). As can be seen in Figure 1 mycorrhizal fungi are surrounding the soil particles to make a strong aggregation.

Mycorrhizal fungi are the largest symbiotic associations between plant roots and fungi that can make a significant contribution on soil physical quality through mycorrhizae fungal hyphae extending into the rhizosphere and thereby improve the absorption of nutrient and water (Ortas, 2003; Karandashov and Bucher, 2005; Smith and Read, 2008). Organic amendment and mycorrhiza are the well-known



aggregate building agents' (Celik *et al.*, 2004). Extensive soil based mycelium of fungus around roots can help soil aggregation processes (Picture Figure 1).

Soil aggregation and soil structure stability by the combined action of extraradical hyphae and hydrophobic proteinaceous substance such as glomalin-related soil protein (Bedini *et al.*, 2009) are very important parameters. As can be seen in Figure 2, under microscopy soil particles are surrounded by mycorrhizal hyphae (Polat and Kapur, 2010).

Miller and Jastrow (1990); Rillig and Mummey (2006) indicated that the strength of the mycorrhizal association and its relationship with soil structure depend on mycorrhizal hyphae and root morphology (Zhang *et al.*, 2017).

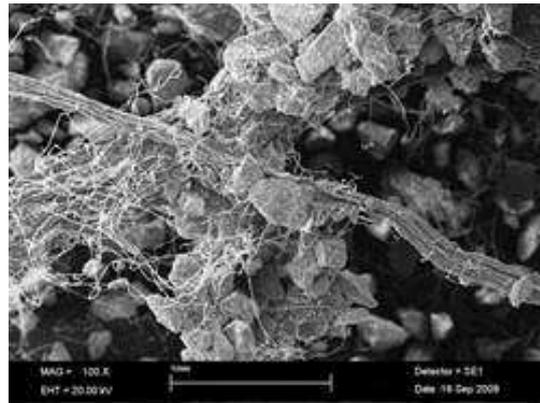


Figure 2. Mycorrhizal hyphae in sandy soil binding coarse grains (SEM) (Polat and Kapur, 2010)

Figure 2 and Figure 3 shows that binding actions such as root, hyphae and microorganism's improvement of soil micro and macro-aggregates.

There was more C concentration in 0.5-1 mm aggregate sizes than in <0.25 mm size range. Also soil physical properties MWD were affected with high organic carbon addition (Ortas and Lal, 2012).

Borie *et al.* (2008) reported that soil structure stability is strongly influenced by the natural properties of soil and the content of soil organic matter. Land use management practices and influencing SOC will be determinant in soil aggregation.



Figure 3. Mycorrhizal hyphae develop macro and micro soil structure



Plant Root and Aggregation

Plant roots also have significant effects on aggregation and stabilization. Nadian *et al.* (2009) shown that Berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.) root length was improved by 20% as soil aggregate diameter increased. The adherence of soil particles and sand grains on the root via AM mycelia were shown by the conceptual diagram of soil aggregation (Figure, 5) drawn by Miller and Jastrow (2000). Glomalin is an abundant component of soil organic matter and has been linked to aggregate stability (Wright and Upadhyaya, 1998). Wright and Upadhyaya (1996) also indicated that increased aggregate stability which leads to better soil structure, in turn, leads to better plant production. The results of Zhang *et al.* (2017) indicated that there is a high correlation between root surface area and root volume with aggregate size and stability.

Since aggregate development is affected by different soil and crop management practices, it is sound to search the effects of crop rotation and long term effects of phosphorus application on aggregate development. The aim of the study is to evaluate the effects of long term P fertilizer in development of rhizosphere and non-rhizosphere soil structure under wheat and maize rotation.

Materials and methods

The work was conducted at the C.U. Agricultural Experimental Station of the Soil Science and Plant Nutrition Research Center in the Mediterranean region of Adana, Turkey (37°00.47.75 N lat. and 35°21'.31.92 E altitude long. 33 m.a.s.l.). The experiment was established in 1998, and since then it is continued through 2019 with two consecutive crops years: wheat in winter and maize in summer terms. The experiment also set up Arik soil series which is classified as typic Haploxererts. There is a typical Mediterranean climate with a long-term average annual air temperature of 19.0 °C (ranging from 14.3°C in January-February to 25.6°C in July – August), and precipitation of 650-680 mm. About 75-80% of the annual precipitation is received during November and April.

The experiment was set up with four treatments such as (1) P0 control, (2) P1 50 kg P₂O₅ ha⁻¹, P2 100 kg P₂O₅ ha⁻¹, and P3 200 kg P₂O₅ ha⁻¹ as 3Ca (H₂PO₄)₂.H₂O and experiment comprised of 12 plots laid out in a randomized block design with three replications, and plot dimensions of 10 X 20 m during 2015 and 2018. Also, plants received 160 kg N ha⁻¹ as (NH₄)₂SO₄, for wheat and 200 kg, N ha⁻¹ as (NH₄)₂NO₃ for maize. Residues of maize and wheat were not removed in the field and they were incorporated by moldboard ploughing to 15- cm depth after each harvest. Soil physical, chemical, and biological properties are presented in Table 1.

Table 1. Soil initial physical, chemical and biological characteristics of Arik soil series

| Properties | Unit | Depth 0-15 cm | |
|------------------------------|------------------------------------|---------------|--------|
| Clay | g kg ⁻¹ | 535 | ±15 |
| Silt | | 291 | ±35 |
| Sand | | 174 | ±44 |
| Soil Organic Carbon | g kg ⁻¹ soil | 0.87 | ±0.07 |
| Inorganic carbon | | 3.44 | ±0.42 |
| Total nitrogen | | 0.09 | ±0.01 |
| CEC | Cmol ⁺ kg ⁻¹ | 35 | ±1.00 |
| pH | H ₂ O | 7.60 | ±0.50 |
| Salt | % | 0.032 | ±0.03 |
| P | mg kg ⁻¹ | 13.52 | ±1.44 |
| K | | 1102.2 | ±14.9 |
| Number of mycorrhizae spores | 10 g ⁻¹ soil | 73.0 | ±22.00 |

Mean of two replicates ± SD.



Soil Sampling, Preparation, and Analyses

Non-distributed soil sample was obtained from 0-15 cm and 15-30 cm depth of rhizosphere and non-rhizosphere after the harvest of wheat and maize from each replicate of all treatments.

Mean Weight Diameter and Soil Water Stable Aggregate (WSA) Analyses

For wheat plant soil samples were collected during 2016 to 2018. For Maize plant soil samples were collected during 2015 to 2017. After air-dried bulk soil samples were gently crushed and sieved through 8 mm sieve. 8 g of aggregates were used for the wet-sieving technique (Yoder, 1936; Youker and McGuiness, 1957). Wet sieving was done by using a nest of five sieves (4.75, 2, 1, 0.5, 0.25 mm) after pre-wetting for 3 minutes. Aggregates retained on each sieve were again washed with deionized water for determining % of WSA. Soil aggregates on different sieves were oven dried at 40°C, and the mean weight diameter (MWD) was determined (van Veen and Kuikman, 1990; Nimmo and Perkins, 2002).

Results and Discussion

Wheat plant

in the year 2016, generally the wheat plant, for three successive years and in 0-15 cm rhizosphere soils with increasing P level application mean weight diameter (MWD) decreased. In 15-30 cm soil depth also MWD was decreased with P level application. However, in non-rhizosphere soil, there was no regular decrease with P level application. In 0-15 cm rhizosphere and non-rhizosphere soils water stability index was decreased (Table 2). In general, 0-15 cm soils have higher MWD than 15-30 cm soil depth. Since plant roots are fringe root, this difference may be related to the root effect.

Under wheat cultivation in both soil depth rhizosphere soils, the size distribution of water-stable aggregates (WSA) increased with an increase in P fertilizer was not significant differences among treatments. In general, a higher WSA (%) was observed in P0 treatments compared with other treatments. The lowest WSA (%) was observed in P1 level application.

For years of 2016 soil depth have significant effects on MWD and WSA $P < 0.0006$ and $P < 0.009$ respectively (Table 3). In non-rhizosphere soils, with increasing P level MWD and WSA % slightly changed, but the change is not statistically significant.

This may be explained in two ways. One with increasing fertilizer application soil organic carbon concentration increased and this increase have effects on aggregation. On the other hand, with increasing P fertilizer aggregation is declined. This is important since fertilizers are salt and there are direct or indirect effects on aggregation. On the mean data's, usually in 0-15 cm total WSA values are bigger than 15-30 cm depth for three years. Total WSA data was greater in rhizosphere soil than non-rhizosphere.

In the year 2017, there are not statically significant differences. For the year 2018, soil depth and P level application have a significant effect on rhizosphere soils MWD and WSA values. Wheat plant data were further analyzed for dendrogram analyses with multiversity cluster observation. It has been found that there is a significant difference between P levels and soil depth effect on dendrogram cluster analyses (Figure 4).



Table 2. Under long term field experiment, the effects of different level P fertilization on wheat plant rhizosphere and non-rhizosphere MWD and water aggregate stabilization in the year of 2016, 2017 and 2018.

| Year | Soil dept. cm | Fertilizer Treatments | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | |
|------|---------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | | | MWD mm | % WSA | MWD mm | % WSA |
| 2016 | 0-15 | 1 Control | 1,96 ±0,02 | 68,49 ±4,36 | 0,88 ±0,17 | 62,41 ±5,75 |
| | | 2 P50 | 1,67 ±0,18 | 67,05 ±4,18 | 0,93 ±0,06 | 62,14 ±1,02 |
| | | 3 P100 | 1,67 ±0,21 | 68,78 ±1,40 | 0,91 ±0,12 | 64,76 ±2,76 |
| | | 4 P200 | 1,58 ±0,13 | 66,83 ±4,01 | 0,99 ±0,20 | 61,43 ±5,13 |
| | | Mean | 1,72 ±0,14 | 67,79 ±3,49 | 0,93 ±0,14 | 62,69 ±3,67 |
| | 15-30 | 5 Control | 1,71 ±0,08 | 63,96 ±2,66 | 0,94 ±0,21 | 58,15 ±9,11 |
| | | 6 P50 | 1,59 ±0,08 | 66,12 ±4,03 | 0,76 ±0,17 | 60,59 ±8,81 |
| | | 7 P100 | 1,38 ±0,06 | 57,80 ±5,56 | 0,83 ±0,09 | 58,12 ±6,26 |
| | | 8 P200 | 1,39 ±0,08 | 62,41 ±6,17 | 0,84 ±0,18 | 64,78 ±5,63 |
| | | Mean | 1,52 ±0,07 | 62,57 ±4,61 | 0,84 ±0,16 | 60,41 ±7,45 |
| 2017 | 0-15 | 1 Control | 1,00 ±0,21 | 58,58 ±2,24 | 0,82 ±0,12 | 50,97 ±12,38 |
| | | 2 P50 | 0,88 ±0,03 | 59,50 ±5,47 | 0,80 ±0,16 | 50,64 ±12,98 |
| | | 3 P100 | 0,92 ±0,10 | 60,26 ±5,24 | 0,81 ±0,18 | 60,26 ±5,24 |
| | | 4 P200 | 0,86 ±0,04 | 61,26 ±18,49 | 0,83 ±0,31 | 61,26 ±18,49 |
| | | Mean | 0,91 ±0,09 | 59,90 ±7,86 | 0,82 ±0,19 | 55,78 ±12,27 |
| | 15-30 | 5 Control | 0,86 ±0,06 | 52,36 ±4,21 | 0,75 ±0,11 | 48,42 ±9,40 |
| | | 6 P50 | 1,01 ±0,58 | 66,43 ±18,86 | 1,00 ±0,58 | 54,90 ±19,01 |
| | | 7 P100 | 0,81 ±0,10 | 50,38 ±7,37 | 0,65 ±0,34 | 38,02 ±20,07 |
| | | 8 P200 | 0,79 ±0,17 | 57,92 ±1,73 | 0,80 ±0,19 | 65,95 ±14,33 |
| | | Mean | 0,87 ±0,23 | 56,77 ±8,04 | 0,80 ±0,31 | 51,82 ±15,70 |
| 2018 | 0-15 | 1 Control | 4,19 ±0,02 | 92,07 ±0,08 | 3,03 ±0,68 | 74,56 ±7,73 |
| | | 2 P50 | 3,27 ±0,48 | 88,38 ±0,49 | 2,17 ±0,22 | 71,79 ±7,26 |
| | | 3 P100 | 3,28 ±0,81 | 81,32 ±6,49 | 1,70 ±0,06 | 70,66 ±0,71 |
| | | 4 P200 | 3,13 ±0,29 | 85,81 ±2,42 | 1,65 ±0,09 | 74,68 ±1,95 |
| | | Mean | 3,47 ±0,40 | 86,89 ±2,37 | 2,14 ±0,26 | 72,92 ±4,42 |
| | 15-30 | 5 Control | 3,63 ±0,40 | 85,30 ±1,12 | 2,84 ±0,41 | 78,96 ±4,27 |
| | | 6 P50 | 3,01 ±0,35 | 82,88 ±2,10 | 2,03 ±0,00 | 74,89 ±1,13 |
| | | 7 P100 | 2,65 ±0,25 | 77,25 ±8,58 | 1,94 ±0,21 | 74,70 ±5,70 |
| | | 8 P200 | 2,52 ±0,13 | 82,59 ±4,18 | 2,44 ±0,30 | 80,64 ±5,22 |
| | | Mean | 2,95 ±0,28 | 82,00 ±3,99 | 2,31 ±0,23 | 77,30 ±4,08 |

*P source was P₂O₅ kg⁻¹ Soil. Means (±SE) within 3 replicates.

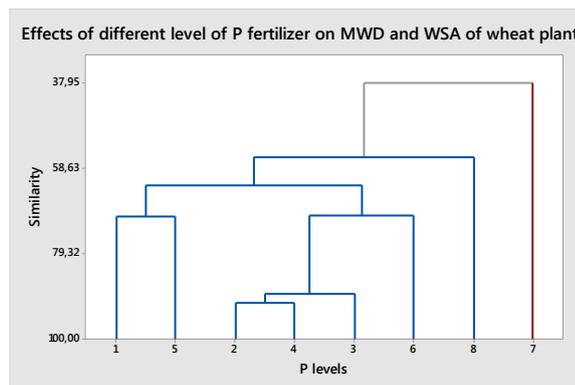


Figure 4. Effect of P levels on wheat plant rhizosphere and non-rhizosphere soil MWD and WSA

Table 3. Under long term P levels on wheat and maize plant aggregation mean wheat diameter and soil water stability. Significance levels for the main effect and interaction mean for the level of P fertilizer on rhizosphere and non-rhizosphere soils MWD and WSA under P levels application for wheat and maize successive rotations. Soil depth and P levels and maize are the main factors.



| Wheat | | 2016 | | | | 2017 | | | | 2018 | | | |
|-------------|----|---|--------|--|--------|---|--------|--|--------|---------------------------|--------|-----------------|--------|
| | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | |
| | | % | | % | | % | | % | | % | | % | |
| Treatments | Df | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA |
| Soil Dept. | 1 | 0.0006 | 0.0088 | 0.2029 | 0.3752 | 0.6150 | 0.4641 | 0.8953 | 0.5211 | 0.0071 | 0.0124 | 0.1928 | 0.0459 |
| P level | 3 | 0.0005 | 0.5330 | 0.8457 | 0.8830 | 0.7828 | 0.5260 | 0.7988 | 0.3270 | 0.0013 | 0.0115 | 0.0001 | 0.2552 |
| Dep * P lev | 3 | 0.4403 | 0.2695 | 0.5913 | 0.5459 | 0.7641 | 0.5389 | 0.7379 | 0.3800 | 0.8538 | 0.8920 | 0.0618 | 0.9667 |
| Maize | | 2015 | | | | 2016 | | | | 2017 | | | |
| | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | |
| | | % <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% </td></td></td></td></td> | | % <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% </td></td></td></td> | | % <td colspan="2">% <td colspan="2">% <td colspan="2">% </td></td></td> | | % <td colspan="2">% <td colspan="2">% </td></td> | | % <td colspan="2">% </td> | | % | |
| Treatments | Df | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA |
| Soil Dept. | 1 | 0.8879 | 0.5415 | 0.8231 | 0.0115 | 0.0473 | 0.0362 | 0.5563 | 0.1173 | 0.5539 | 0.5147 | 0.3734 | 0.4515 |
| P level | 3 | 0.9652 | 0.6862 | 0.2423 | 0.4818 | 0.3285 | 0.3202 | 0.1636 | 0.6851 | 0.0641 | 0.0031 | 0.0209 | 0.0010 |
| Dep * P lev | 3 | 0.1668 | 0.7003 | 0.9495 | 0.6598 | 0.0756 | 0.3328 | 0.6965 | 0.5217 | 0.9257 | 0.2928 | 0.9804 | 0.8802 |

Table 3: Under long term P levels on wheat and maize plant aggregation mean wheat diameter and soil water stability. Significance levels for the main effect and interaction mean for the level of P fertilizer on rhizosphere and non-rhizosphere soils MWD and WSA under P levels application for wheat and maize successive rotations. Soil depth and P levels and maize are the main factors.

| Maize | | 2015 | | | | 2016 | | | | 2017 | | | |
|-------------|----|-------------|--------|-----------------|--------|-------------|--------|-----------------|--------|-------------|--------|-----------------|--------|
| | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | |
| | | % | | % | | % | | % | | % | | % | |
| Treatments | Df | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA | MWD | WSA |
| Soil Dept. | 1 | 0.8879 | 0.5415 | 0.8231 | 0.0115 | 0.0473 | 0.0362 | 0.5563 | 0.1173 | 0.5539 | 0.5147 | 0.3734 | 0.4515 |
| P level | 3 | 0.9652 | 0.6862 | 0.2423 | 0.4818 | 0.3285 | 0.3202 | 0.1636 | 0.6851 | 0.0641 | 0.0031 | 0.0209 | 0.0010 |
| Dep * P lev | 3 | 0.1668 | 0.7003 | 0.9495 | 0.6598 | 0.0756 | 0.3328 | 0.6965 | 0.5217 | 0.9257 | 0.2928 | 0.9804 | 0.8802 |

Maize Plant

For the year 2016, in 0-15 cm rhizosphere soil the MWD ranged from 0,78 mm in control to 0,94 mm in P3 treatments (Table 4). For non-rhizosphere soil, MWD ranged from 0,94 mm in control treatments and 0.97 mm in P3 treatments. In the year 2018 with increasing P fertilizer MWD decreased for both soil depths. In 0-15 cm rhizosphere soils, MWD ranged 2,86 mm in control to 2,29 mm in p3 treatments. For the years 2016 and 2017, there is no statistically significant effects on maize grown soil MWD. However, for the year 2018 P level application have statistically



significant effects on MWD and WSA values. In all three years with increasing P level total WSA % decreased. In 2016, 0-15 cm rhizosphere soil ranged from 60,55 % in control to 57.86 % in P3. Similarly, in non-rhizosphere soils, WSA ranged from 75.64 % in P0 and 66.83 % in P3. In generally rhizosphere soil have higher WSA % than in non-rhizosphere soil. In addition to more retention of previous plant residues and soil, biological factors may have enhanced aggregate stabilization. Despite the strong trend, there were no significant differences in WSA among P1, P2 and P3 treatments, probably because of the masking effect of high clay content.

Table 4. effects of long term P fertilizer application on maize grew rhizosphere and non-rhizosphere soil aggregate stability and mean weight diameters in the year of 2016, 2017 and 2018

| Year | Soil dept. cm | Fertilizer Treatments | Rhizosphere | | Non-Rhizosphere | |
|------|------------------|--------------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | | | MWD mm | % WSA | MWD mm | % WSA |
| 2015 | 0-15 | Control | 0,78±0,09 | 60,55±9,62 | 0,94±0,07 | 75,64±4,59 |
| | | P50 | 0,99±0,22 | 63,83±11,65 | 0,97±0,11 | 68,69±3,41 |
| | | P100 | 0,95±0,09 | 59,53±3,59 | 0,78±0,05 | 60,95±10,83 |
| | | P200 | 0,94±0,08 | 57,86±12,08 | 0,97±0,10 | 66,83±5,63 |
| | | Mean | 0,92±0,12 | 60,44±9,24 | 0,92±0,08 | 68,03±6,12 |
| | 15-30 | Control | 1,03±0,22 | 68,96±9,61 | 0,89±0,11 | 58,23±12,49 |
| | | P50 | 0,86±0,27 | 59,77±16,18 | 1,00±0,05 | 58,65±6,70 |
| | | P100 | 0,89±0,04 | 65,58±5,51 | 0,84±0,11 | 57,12±7,90 |
| | | P200 | 0,83±0,06 | 57,71±6,17 | 0,99±0,39 | 52,19±18,25 |
| | | Mean | 0,91±0,15 | 63,01±9,37 | 0,93±0,17 | 56,55±11,34 |
| 2016 | 0-15 | Control | 3,02±0,31 | 80,63±4,19 | 2,95±0,52 | 81,65±1,95 |
| | | P50 | 4,27±0,22 | 87,85±2,04 | 2,27±0,28 | 76,80±3,00 |
| | | P100 | 3,17±0,97 | 81,18±8,28 | 3,05±0,21 | 84,74±2,45 |
| | | P200 | 3,77±0,85 | 83,41±4,39 | 1,53±0,21 | 75,45±4,78 |
| | | Mean | 3,56±0,59 | 83,27±4,73 | 2,45±0,30 | 79,66±3,04 |
| | 15-30 | Control | 4,31±0,88 | 87,20±2,62 | 3,14±1,24 | 87,25±10,17 |
| | | P50 | 4,26±0,37 | 87,79±0,40 | 2,26±1,39 | 82,65±12,19 |
| | | P100 | 4,60±0,08 | 88,18±0,47 | 2,82±1,55 | 82,63±11,98 |
| | | P200 | 3,40±0,92 | 84,77±3,12 | 2,47±0,25 | 86,72±5,30 |
| | | Mean | 4,14±0,56 | 86,98±1,65 | 2,67±1,11 | 84,81±9,91 |
| 2017 | 0-15 | Control | 2,86±0,42 | 80,32±1,73 | 3,37±0,84 | 79,19±6,15 |
| | | P50 | 2,05±0,27 | 67,58±3,48 | 2,16±0,42 | 64,45±8,99 |
| | | P100 | 2,34±1,19 | 75,82±7,90 | 3,25±0,33 | 83,09±9,46 |
| | | P200 | 2,29±0,12 | 79,86±1,27 | 2,60±0,34 | 81,11±5,64 |
| | | Mean | 2,38±0,50 | 75,90±3,60 | 2,84±0,48 | 76,96±7,56 |
| | 15-30 | Control | 3,17±0,60 | 85,16±5,08 | 3,09±0,92 | 77,97±8,89 |
| | | P50 | 2,13±0,37 | 69,90±9,47 | 2,03±0,23 | 68,83±1,42 |
| | | P100 | 2,62±0,65 | 80,50±5,88 | 2,88±0,92 | 84,60±0,32 |
| | | P200 | 2,20±0,09 | 73,86±1,40 | 2,47±0,39 | 84,55±3,30 |
| | | Mean | 2,53±0,43 | 77,36±5,46 | 2,62±0,62 | 78,99±3,48 |

*P source was P₂O₅ kg⁻¹ Soil. Means (±SE) within 3 replicates.

In general, in many studies, WSA results are classified as moderate to high stables (54 to 89 %). The results are shown that WSI is in between 60-885% which are in high stability classes. Maize plant grown soil aggregate development dates were further analyzed and it has been found that there is a significant difference in between P level application. There is high similarity for P1 and P3 treatments. Also, there is less similarity for control and P2 treatments (Figure 5).

Previously in the same experiment, it has been searched that the aggregation size distribution and it has been found by Ortas and Lal (2012) results indicate the mean weight diameter (MWD) of macro-aggregates of 1-2 mm diameter (Figure 6). The results of (Bedini *et al.*, 2009) revealed that MWD values of soil aggregates were significantly correlated with values of total mycorrhizal hyphal length.

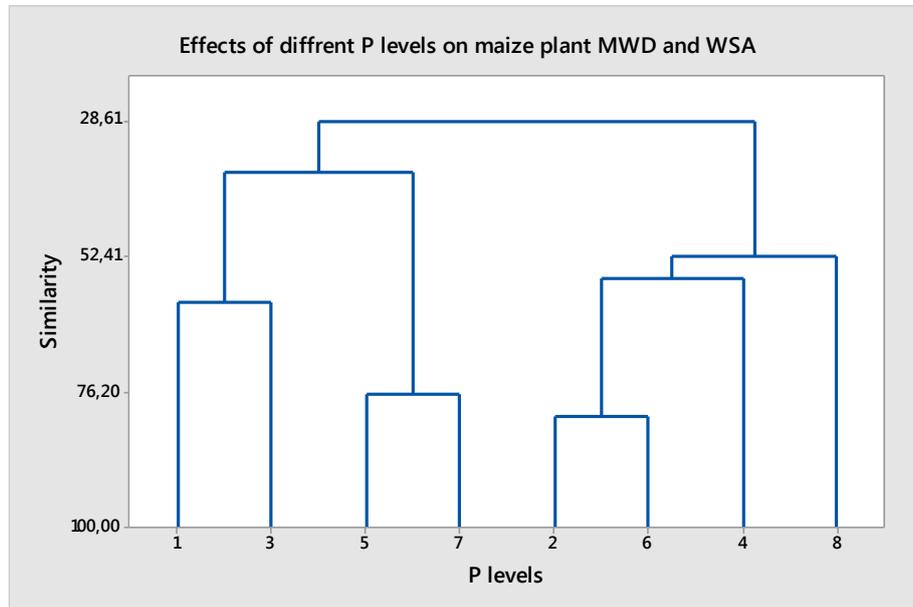


Figure 5. Effect of P levels on wheat plant rhizosphere and non-rhizosphere soil MWD and WSA

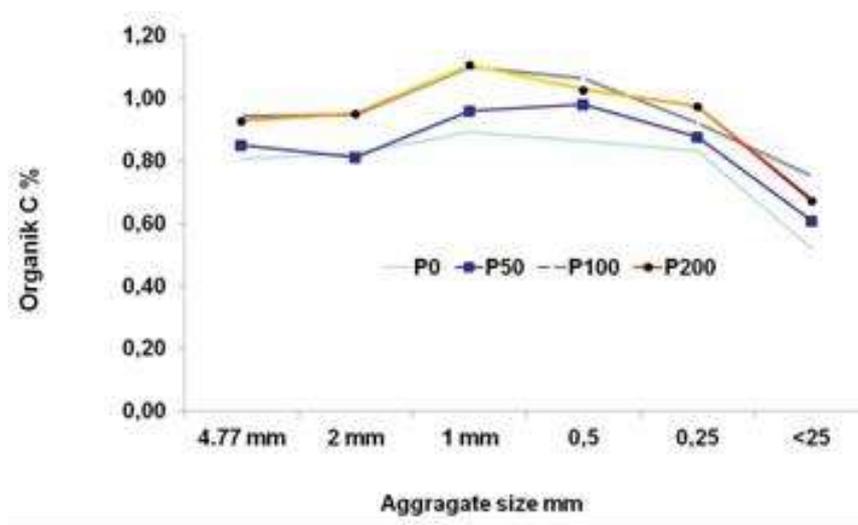


Figure 6. Effect of different level of phosphorus application under long term experimentation on soil organic carbon contents (Ortas and Lal, 2012).

Conclusion

Since 1998, under long term, P fertilizer field conditions several levels of P fertilizer are applied on wheat and maize cropping system at harvest soil and plant quality parameters including soil aggregate development are determined. In general, the soils have different aggregate size capacity and aggregate stability in between wheat and maize plants. Also, there is a significate effect of years on aggregation. Mainly with increasing P level addition aggregate MWD is decreased. In addition



to this, there is low MWD and SWI in deep soil depth. Rhizosphere soil has higher MWD and WSA data than non-rhizosphere soils.

References

- Bedini, S., Pellegrino, E., Avio, L., Pellegrini, S., Bazzoffi, P., Argese, E., Giovannetti, M., 2009. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1491-1496.
- Borie, F., Rubio, R., Morales, A., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.* 8, 9-18.
- Cabria, I., López, M., Alonso, J., 2005. Enhancement of hydrogen physisorption on graphene and carbon nanotubes by Li doping. *The Journal of chemical physics* 123, 204721.
- Caravaca, F., Garcia, C., Hernandez, M.T., Roldan, A., 2002. Aggregate stability changes after organic amendment and mycorrhizal inoculation in the afforestation of a semiarid site with *Pinus halepensis*. *Applied Soil Ecology* 19, 199-208.
- Celik, I., Ortas, I., Kilic, S., 2004. Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil & Tillage Research* 78, 59-67.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994. Soil-structure and carbon cycling. *Australian Journal of Soil Research* 32, 1043-1068.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M., Lussenhop, J., 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology & Biochemistry* 30, 905-916.
- Karandashov, V., Bucher, M., 2005. Symbiotic phosphate transport in arbuscular mycorrhizas. *Trends in Plant Science* 10, 22-29.
- Lal, R., 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81, 113-127.
- Mikha, M.M., Benjamin, J.G., Vigil, M.F., Nielson, D.C., 2010. Cropping Intensity Impacts on Soil Aggregation and Carbon Sequestration in the Central Great Plains. *Soil Science Society of America Journal* 74, 1712-1719.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D., 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biology & Biochemistry* 22, 579-584.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D., 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure In: Kapulnik, Y., Douds, J.D.D. (Eds.), *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 3-18.
- Nadian, H., Hashemi, M., Herbert, S.J., 2009. Soil Aggregate Size and Mycorrhizal Colonization Effect on Root Growth and Phosphorus Accumulation by Berseem Clover. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40, 2413-2425.
- Nimmo, J.R., Perkins, K.S., 2002. Aggregate stability and size distribution In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis*. SSSA, Madison, WI., pp. 317-328.
- Ortas, I., 2003. Effect of selected mycorrhizal inoculation on phosphorus sustainability in sterile and non-sterile soils in the Harran Plain in South Anatolia. *Journal of Plant Nutrition* 26, 1-17.
- Ortas, I., Lal, R., 2012. Long-Term Phosphorus Application Impacts on Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen Sequestration in a Vertisol in the Mediterranean Turkey. *Soil Science* 177, 241-250.
- Ortaş, I., Lal, R., Kapur, S., 2017. Carbon Sequestration and Mycorrhizae in Turkish Soils. *Carbon Management, Technologies, and Trends in Mediterranean Ecosystems*. Springer, pp. 139-149.
- Pendell, D.L., Williams, J.R., Boyles, S.B., Rice, C.W., Nelson, R.G., 2007. Soil carbon sequestration strategies with alternative tillage and nitrogen sources under risk. *Rev. Agric. Econ.* 29, 247-268.



- Polat, O., Kapur, S., 2010. The Determination of the Changes in Soil Properties of the Stone Pine (*Pinus Pinea* L.) Plantations in the Turan Emeksiz Sand Dune Area. University of Çukurova, Institute of Science Journal, Adana (in Turkish) 23, 167-174.
- Rillig, M.C., 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science* 84, 355-363.
- Rillig, M.C., Mummey, D.L., 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171, 41-53.
- Rimal, B.K., Lal, R., 2009. Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall. *Soil & Tillage Research* 106, 62-70.
- Roth, C.H., 1997. Bulk density of surface crusts: depth functions and relationships to texture. *Catena* 29, 223-237.
- Shrestha, R.K., Lal, R., 2007. Soil carbon and nitrogen in 28-year-old land uses in reclaimed coal mine soils of Ohio. *Journal of Environmental Quality* 36, 1775-1783.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 2099-2103.
- Smith, S.E., Read, D.J., 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, San Diego, CA.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. Organic-matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33, 141-163.
- Tisdall, J.M., Smith, S.E., Rengasamy, P., 1997. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Australian Journal of Soil Research* 35, 55-60.
- van Veen, J.A., Kuikman, P.J., 1990. Soil structure aspects of decomposition of organic matter by microorganisms *Biogeochemistry* 11, 213-223.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science* 161, 575-586.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97-107.
- Wu, Q.S., Srivastava, A.K., Cao, M.Q., Wang, J., 2015. Mycorrhizal function on soil aggregate stability in root zone and root-free hyphae zone of trifoliolate orange. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61, 813-825.
- Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of physical nature of erosion. *J. American Society of Agronomy* 28, 337-351.
- Youker, R.E., McGuinness, J.L., 1957. A short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analyses of soils *Soil Science* 83, 291-294.
- Zhang, Y.C., Wang, P., Wu, Q.H., Zou, Y.N., Bao, Q., Wu, Q.S., 2017. Arbuscular mycorrhizas improve plant growth and soil structure in trifoliolate orange under salt stress. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63, 491-500.
- Zou, Y.N., Srivastava, A.K., Ni, Q.D., Wu, Q.S., 2015. Disruption of mycorrhizal extraradical mycelium and changes in leaf water status and soil aggregate stability in rootbox-grown trifoliolate orange. *Frontiers in Microbiology* 6.



УДК 631.42

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВЕТЛО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ В БОГАРНЫХ УСЛОВИЯХ ГОРНОГО ШИРВАНА

Ахмедова А.М., Гумматов Н.Г.

Научно-исследовательский институт земледелия, Баку, Азербайджан
torpaq80@mail.ru

ESTIMATION OF INDICATORS OF AGROPHYSICAL STATE OF THE LIGHT CHESTNUT SOIL IN RAINFED CONDITION OF THE MOUNTAIN SHIRVAN

Akhmedova A.M., Hummatov N.G.

Research Institute of Crop Husbandry, Baku, Azerbaijan

Annotation: The article presents the results of investigation of indicators of agrophysical state of light chestnut soil in the rainfed condition of the Mountain Shirvan. The results show that, agrophysical state indicators of the soil depend on soil-climate condition, depth of soil layer, growth stage of plants and cover crop. Also, relatively optimal soil-physical condition have been observed in the intensive development stage of plants.

Введение

В последнее время деградация почв, обусловленная природными и антропогенными факторами стала главной почвенно-экологической проблемой, уменьшающей урожайность и ограничивающей производство устойчивых растительных продуктов во всем мире. В результате деградации ухудшаются качественные показатели почвы и значительно изменяются ее физические, химические и биологические свойства (Paluszek, 2014; Virginijus et al., 2008). Интенсивность процесса деградации в условиях не гармонического агроэкологического развития превышает интенсивность самостоятельного восстановления почвы. Поэтому с точки зрения влияния возможных антропогенных факторов можно регулировать снижение влияния тех или иных факторов, отрицательно влияющих на сохранения плодородия почвы. Наряду с этим, сохранение земельных ресурсов, являющихся основными элементами устойчивого развития, с целевым и эффективным использованием, имеет важное значение с научной и практической точки зрения.

Объекты и методы

Исследования проводились в 2014-2017 годах в агроценозе озимых зерновых культур в богарных условиях Горного Ширвана на Гобустанской зонально-опытной станции НИИ Земледелия МСХ Азербайджанской Республики. Почвенный покров станции представлен, в основном, светло-каштановой почвой легкого и средне-глинистого гранулометрического состава. Среднегодовое количество осадков в районе составляет 250-450 мм, а высотное положение территории исследования – 730-820 м над уровнем моря. По данным Гобустанской гидрометеорологической станции, на территории исследования в 2014-2015 вегетационном году выпало 263,9 мм осадков, в 2015-2016 – 391,9 мм, а в 2016-2017 – 542,9 мм осадков. По сравнению со средними многолетними показателями (399 мм) 2016-2017 вегетационный год отличался от других.

Образцы почвы для агрофизических анализов отбирали 3-6 раз в 9-кратной повторности за вегетационный период с двух глубин (10-15 см и 35-40 см). Свойства почвы были определены стандартными агрофизическими методами (Вадюнина, Корчагина, 1986). Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета программ Minitab Release 14 с пятипроцентным уровнем значимости (Minitab Inc., 2003). Для проверки гипотезы о



нормальности распределений агрофизических показателей использовали критерий Райан-Джойнера (RJ).

Результаты и обсуждение

Результаты определения агрофизических свойств почв представлены в таблице. Больше 95% случаев RJ-критерий показал, что данные подчиняются нормальному закону распределения. Соблюдение гипотезы о нормальности распределения позволяет провести сравнительный анализ средних значений определяемых параметров.

Результаты определения агрофизических свойств почв представлены в таблице. Больше 95% случаев RJ-критерий показал, что данные подчиняются нормальному закону распределения. Соблюдение гипотезы о нормальности распределения позволяет провести сравнительный анализ средних значений определяемых параметров.

Из таблицы видно что, массовая влажность почвы (W), плотность (ρ_b), пористость общая (ϵ_t) и пористость аэрации (ϵ_a), количество агрономически ценных (АЦА) и водопрочных агрегатов (ВА), средневзвешенный диаметр структурных (D_s) и водопрочных (D_w) агрегатов в течении исследования изменялись в следующих диапазонах: в пахотном слое – W : 5.15-27.56%, ρ_b : 1.076-1.420 г/см³, ϵ_t : 59.40-46.41%, ϵ_a : 41.49-20.94%, АЦА: 75.7-85.3%, D_s : 3.39-6.22 мм, ВА: 31.30-49.95%, D_w : 0.31-0.47 мм; в подпахотном слое – W : 11.26-24.47%, ρ_b : 1.329-1.423 г/см³, ϵ_t : 49.85-46.30%, ϵ_a : 32.91-15.77%, АЦА: 74.0-85.9%, D_s : 3.19-6.36 мм, ВА: 35.44.-49.62%, D_w : 0.37-0.45 мм.

Как известно, влажность почвы в богарных условиях является основным источником влаги для растений (Aikins, Afuakwa, 2012). Этот динамический эко-гидрологический показатель обуславливает жизнедеятельность растений. В период исследования влажность почвы, в основном, зависела от времени и количества осадков. Так, во всех трех вегетационных годах влажность почвы уменьшалась к концу вегетации и имела минимальное значение в пахотном слое после уборки урожая (5.15%).

Известно, что плотность почвы является важным эко-агрофизическим динамическим параметром. Большие значения плотности почвы наблюдаются в подпахотном слое, а малые – в пахотном слое. Самая высокая плотность (1.423 г/см³) была отмечена в фазе выхода в трубку растений в подпахотном слое в 2014-2015 вегетационном году, а самая низкая (1.076 г/см³) в 2015-2016 – в пахотном слое в фазе кущения. За вегетационный период плотность почвы, близкие к оптимальным значениям обнаруживаются в фазе интенсивного развития растений, что, помимо других факторов, может быть обусловлено интенсивностью роста корневой системы в горизонтальных и вертикальных плоскостях. По существующим грациям на экспериментальных участках значения плотности почвы можно считать удовлетворительными для зерновых культур (Шеин, 2005).

Пористость во взаимодействии со многими почвенными свойствами оказывает определенное влияние на развитие корневой системы растений, аэрацию почвы и запас продуктивной влаги [Шеин, 2005; Aikins, Afuakwa, 2012; Ferras et al., 2000). За период исследования общая пористость почвы в пахотных и подпахотных слоях изменилась в интервале 46.30-59.40%. Её самое высокое значение был отмечен в 2014-2015 вегетационном году после посева пахотном слое (58.01%), в 2015-2016 – в фазе кущение (59.40%), в 2016-2017 – в фазе выхода в трубку (55.12%).

Общая пористость по грациям может быть оценена как хорошая (>55%) для пахотного слоя почвы (Шеин, 2005).

Не капиллярная часть пористости почвы – пористость аэрации изменялась в пахотных и подпахотных слоях в интервале 15.77-41.49%. Как известно, пористость аэрации считается



хорошей если она >25%, если она колеблется между 10-25%, то средняя, а если <10% критическая (Velykis, Satkus, 2005). С этой точки зрения пористость аэрации почвы можно оценить, как средняя и хорошая.

Средние значения агрофизических свойств светло-каштановых почв

| Дата | Глубина (см) | Агрофизические показатели | | | | | | | |
|----------------|-----------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|------------|------------------------|-----------|------------------------|
| | | W (%) | ρ_b (г/см ³) | ϵ_t (%) | ϵ_a (%) | АЦА (%) | D _s (мм) | ВА (%) | D _w (мм) |
| 2014-2015 в.г. | | | | | | | | | |
| 11.11.14 | 10-15 | 24.52 | 1.117 | 58.01 | 31.10 | 75.7 | 5.62 | 33.89 | 0.34 |
| | 35-40 | 15.45 | 1.402 | 47.09 | 25.63 | 74.0 | 5.76 | 39.95 | 0.42 |
| 27.03.15 | 10-15 | 25.30 | 1.240 | 53.21 | 21.13 | 78.1 | 5.54 | 31.30 | 0.31 |
| | 35-40 | 22.74 | 1.378 | 47.99 | 17.36 | 77.2 | 5.75 | 35.44 | 0.37 |
| 01.05.15 | 10-15 | 17.64 | 1.331 | 49.79 | 26.30 | 79.0 | 4.56 | 31.83 | 0.33 |
| | 35-40 | 18.80 | 1.423 | 46.30 | 19.67 | 80.0 | 4.47 | 35.74 | 0.37 |
| 27.05.15 | 10-15 | 14.63 | 1.317 | 50.29 | 31.02 | 82.4 | 3.55 | 33.36 | 0.35 |
| | 35-40 | 15.40 | 1.400 | 47.18 | 25.68 | 79.0 | 4.55 | 37.56 | 0.40 |
| 22.06.15 | 10-15 | 14.63 | 1.342 | 49.42 | 38.93 | 82.1 | 3.68 | 35.68 | 0.35 |
| | 35-40 | 15.40 | 1.384 | 47.80 | 30.04 | 78.1 | 4.66 | 41.41 | 0.40 |
| 21.08.15 | 10-15 | 5.15 | 1.371 | 48.28 | 41.49 | 76.2 | 4.64 | 49.95 | 0.47 |
| | 35-40 | 11.26 | 1.407 | 46.49 | 32.91 | 76.2 | 4.56 | 47.82 | 0.43 |
| 2015-2016 в.г. | | | | | | | | | |
| 24.11.15 | 10-15 | 24.98 | 1.258 | 52.54 | 21.25 | 76.8 | 4.32 | 41.86 | 0.31 |
| | 35-40 | 18.28 | 1.387 | 47.67 | 22.42 | 82.2 | 4.64 | 49.62 | 0.42 |
| 24.03.16 | 10-15 | 27.56 | 1.076 | 59.40 | 29.71 | 85.3 | 6.22 | 42.94 | 0.34 |
| | 35-40 | 24.47 | 1.329 | 49.85 | 17.42 | 85.9 | 6.36 | 44.39 | 0.38 |
| 20.05.16 | 10-15 | 22.33 | 1.316 | 50.35 | 20.94 | 76.1 | 3.44 | 34.44 | 0.31 |
| | 35-40 | 20.16 | 1.411 | 46.72 | 18.30 | 81.4 | 4.91 | 44.72 | 0.45 |
| 14.07.16 | 10-15 | 10.23 | 1.420 | 46.41 | 31.87 | 76.5 | 3.39 | 40.66 | 0.36 |
| | 35-40 | 15.31 | 1.354 | 47.70 | 26.53 | 84.9 | 6.16 | 44.14 | 0.43 |
| 2016-2017 в.г. | | | | | | | | | |
| 13.04.17 | 10-15 | 27.41 | 1.192 | 55.12 | 22.30 | 80.1 | 4.23 | 34.51 | 0.31 |
| | 35-40 | 23.47 | 1.375 | 48.00 | 15.77 | 82.3 | 4.17 | 42.18 | 0.42 |
| 07.06.17 | 10-15 | 19.83 | 1.237 | 53.31 | 21.19 | 80.4 | 3.53 | 33.78 | 0.32 |
| | 35-40 | 17.03 | 1.353 | 48.94 | 25.88 | 84.6 | 3.19 | 37.74 | 0.38 |
| 15.07.17 | 10-15 | 15.20 | 1.264 | 52.29 | 32.53 | 81.0 | 3.90 | 33.23 | 0.35 |
| | 35-40 | 17.32 | 1.355 | 48.88 | 25.42 | 79.6 | 3.95 | 35.53 | 0.39 |

Примечание. W – массовая влажность, ρ_b – плотность, ϵ_t – общая пористость, ϵ_a – пористость аэрации, АЦА – количество агрономически ценных агрегатов размером 10-0.25 мм, D_s – средневзвешенный диаметр структурных агрегатов, ВА – количество водопрочных агрегатов размером больше 0.25 мм, D_w – средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов. Время опробования по фазам развития растений: 11.11.14; 24.11.15 – сразу после посева, 27.03.15; 24.03.16 – кущение, 13.04.17; 01.05.15 – трубкование, 27.05.15; 20.05.16 – колошение, 07.06.17 молочная спелость, 22.06.15; 14.07.16; 15.07.17 – полная спелость, 21.08.15 – после укоса.

В период исследования структурный состав почвы подвергается изменению в зависимости от глубины и фаз развития растений. АЦА в пахотных и подпахотных слоях



изменяются в интервале 74.0-85.9 %, и его большие значения наблюдаются в пахотном слое. В конце вегетации АЦА приближаясь к своим равновесным значениям стабилизируется. В этом случае структуру почвы по существующим грациям можно оценивать как очень хорошую (>70%) (Шеин, 2005).

Постольку обнаружение изменений, происходящих в структурном состоянии почвы, путем сравнения распределения агрегатов разных размеров создает определенные трудности, поскольку эти изменения часто выражаются в одной обобщенной величине. С этой целью рассчитывается средневзвешенный диаметр агрегатов (Шеин, 2005). В 2014-2015 и 2016-2017 вегетационных годах, тенденция изменения средневзвешенного диаметра структурных агрегатов в пахотных и подпахотных слоях почвы была аналогичной и уменьшилась к концу вегетации. В годы вышеуказанного периода исследования, относительно большие значения этой величины наблюдались после посева, а в 2015-2016 вегетационном году в фазе кущения растений. Поскольку средневзвешенный диаметр структурных агрегатов за весь период исследования в пахотных слоях варьировался в диапазоне 3.39-6.22 мм, а в подпахотных слоях в диапазоне 3.19-6.36 мм, структуру почвы по этому параметру можно оценивать, как очень хорошая (<9.0 мм) (Paluszek, 2014).

В период исследования на обеих глубинах количество водопрочных агрегатов изменяясь в интервале 31.30-49.95% имела наибольшие значения в конце вегетации растения в фазе полной спелости. Водопрочность агрегатов подпахотного слоя наиболее высока, чем водопрочность агрегатов пахотного слоя, и это может быть связано с глубиной залегания карбонатов и увеличением их содержания. По количеству водопрочных агрегатов больше 0.25 мм водопрочность почвы на экспериментальном участке может быть оценена как слабая и средняя (Мамедов, 1989). В период исследования средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов имел наибольшие значения в подпахотном слое почвы, чем в пахотном слое и варьировался в диапазоне 0.31-0.47 мм, в результате этого он может быть оценен как слабый и очень слабый (Paluszek, 2014).

Выводы

По результатам исследования можно отметить, что в богарных условиях Горного Ширвана Азербайджанской Республики, структурность, водопрочность и другие показатели агрофизического состояния светло-каштановых почв в зависимости от растительного покрова, климатических условий года, толщины почвенного слоя и других факторов обладая внутри вегетационной динамикой и имея определенные пространственные изменчивости в пахотных и подпахотных слоях были подвержены дифференциации. В большинстве случаев почвенно-физические условия близкие к оптимальным обнаруживаются в фазе интенсивного развития растений.

Литература

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 416 с.
- Мамедов Р.Г. (1989) Агрофизические свойства почв Азербайджанской ССР. Баку: Элм, 244 с.
- Шеин Е.В. (2005) Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 432 с.
- Aikins S.H.M., Afuakwa J.J. (2012) Effect of four different tillage practices on soil physical properties under cowpea. *Agric. Biol. J. N. Am.* **3**, 17-24.
- Ferras L.A., Costa J.L., Garcia F.O., Pecorari C. (2000) Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded petrocalcic paleudoll of the southern Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* **54**, 31-39.



- Minitab Inc. (2003) MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, Pennsylvania
- Paluszek J. (2014) Air-dry and water-stable soil aggregate distribution of polish chernozems classified in various complexes of agricultural suitability. *Pol. J. Envir. Stud.* **23**, 813-821.
- Velykis A., Satkus A.(2005) Soil protection value of winter crops and reduced tillage on clay loams. *Agron. Res.* **3**, 211-218.
- Virginijus Feiza, Dalia Feizienė, Gražina Kadžienė. (2008) Agro-physical properties of endocalcari epihypogleyic cambisol arable layer in long-term soil management systems. *ŽEMĖS ŪKIO MOKSLAI* **15**, 13-23.



УДК 631.41

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ МЕДИ ЧЕРНОЗЕМАМИ РАЗЛИЧНОГО ГРАНЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Бауэр Т.В.¹, Пинский Д.Л.², Минкина Т.М.¹, Замулина И.В.¹, Бурачевская М.В.¹, Манджиева С.С.¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Bauertatyana@mail.ru

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Российская Федерация

Pinsky43@mail.ru

FEATURES OF COPPER SORPTION BY CHERNOZEMS, DEPENDING ON DIFFERENT PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

Bauer T.V.¹, Pinski D.L.², Minkina T.M.¹, Zamulina I.V.¹, Burachevskaya M.V.¹, Mandzhiyeva S.S.¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

Annotation: The adsorption isotherms Cu^{2+} by Chernozems are described by the Langmuir equation. The maximum adsorption of Cu^{2+} (C_x) is influenced mainly by the particles size. The adsorption of the affinity (K_1) is influenced largely chemical and mineralogical composition of soil.

Введение

В настоящее время серьёзную опасность для окружающей среды представляет загрязнение тяжелыми металлами (ТМ). Среди ТМ одним из приоритетных загрязняющих веществ биосферы является медь. Поступая в окружающую среду из техногенных источников, медь активно воздействует на все компоненты среды. Однако наибольшую нагрузку при этом испытывают почвы (Панин, Сиromля, 2005). Это связано со способностью почв прочно связывать медь в малоподвижные соединения и таким способом выполнять роль природного буфера и детоксиканта.

Иммобилизация ТМ в почвах осуществляется главным образом высокодисперсными фракциями почв за счет адсорбционных механизмов и определяется их минералогическим и химический составом, а, следовательно, физико-химическими свойствами. Гранулометрический состав почв играет очень важную роль в поглощении меди. Особое значение имеют высокодисперсные фракции почв: физической глины (< 0.01 мм), средней и мелкой пыли (0.01–0.001 мм) и ила (< 0.001 мм) (классификация Н.А. Качинского, 1958). Фракции ила и пыли наиболее динамичны и активны в почвах, поскольку имеют развитую поверхность (Крыщенко и др., 2008). Они характеризуются высокой поглотительной способностью по отношению к ТМ и к меди, в частности. Так, по величинам сорбционной емкости железистых и глинистых минералов, входящих в состав илистых фракций, катионы ТМ располагаются в ряд: $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ (Ладонин, Пляскина, 2004). По прочности связи адсорбированных ионов с илистой фракцией характерна другая последовательность: $\text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей поглощения меди черноземными почвами Ростовской области, различающимися по гранулометрическому составу.



Объекты и методы

В качестве объектов исследования выбраны верхние гумусовые горизонты (0-20 см) почв чернозема обыкновенного карбонатного среднетяжелосуглинистого на лессовидных суглинках; чернозема южного карбонатного среднетяжелосуглинистого на желто-бурых структурных глинах; чернозема южного среднетяжелосуглинистого на желто-бурых лессовидных суглинках; чернозема южного среднетяжелосуглинистого на песках Ростовской области.

Определение основных физико-химических свойств почв проводили общепринятыми методами (табл. 1): рН водной вытяжки – потенциометрическим в суспензиях при соотношении почва : вода = 1 : 2,5; содержание органического вещества титриметрическим методом (бихроматное окисление по И.В. Тюрину); содержание карбонатов по методу Кудрина (Воробьева, 2006); емкость катионного обмена (ЕКО) и обменные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} – по методу Шаймухаметова (1993); гранулометрический состав почвы методом пипетки с пирофосфатной подготовкой пробы (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Таблица 1. Физические и химические свойства исследуемых почв

| Показатели | Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый | Чернозем южный | | |
|---|---|-------------------|-------------------------|------------|
| | | тяжелосуглинистый | среднетяжелосуглинистый | супесчаный |
| Физическая глина (%) | 48.1 | 53.9 | 31.4 | 12.4 |
| Ил (%) | 28.6 | 31.0 | 19.1 | 8.0 |
| Сорг (%) | 3.7 | 2.3 | 2.0 | 1.8 |
| рН | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.2 |
| CaCO_3 (%) | 0.1 | 0.5 | - | - |
| $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (сМ(+)/кг) | 35.0 | 33.9 | 29.5 | 24.9 |
| ЕКО (сМ(+)/кг) | 36.0 | 35.2 | 31.8 | 25.9 |

Для изучения механизмов адсорбции меди исследуемыми черноземами использовали растворы нитратов металла в концентрациях 0.05; 0.08; 0.1; 0.3; 0.5; 0.8 и 1.0 мМ/л. Навески почвы, пропущенные через сито с диаметром ячеек 1 мм, в естественной ионной форме заливали соответствующими растворами $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в соотношении почва: раствор, равном 1:10. Диапазон концентраций Cu^{2+} в изучаемой системе охватывает различные геохимические ситуации и реально существующие уровни загрязнения почв исследуемым металлом.

Суспензии взбалтывали в течение часа и оставляли на сутки в состоянии покоя, после чего фильтровали. Содержание металла в фильтрах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Количество поглощенных катионов Cu^{2+} рассчитывали по разности между концентрациями металла в исходном и равновесном растворе.

Повторность экспериментов 3-х кратная. Статистическую обработку результатов и расчет коэффициентов детерминации производили в программах SigmaPlot 12.5 и MS Excel 2007 при доверительной вероятности 0.95.

Результаты и обсуждение

Изотермы адсорбции Cu^{2+} черноземом обыкновенным и черноземами южными разного гранулометрического состава представлены на рисунке 1. Из графиков видно, что во всех



случаях изотермы адсорбции Cu^{2+} имеют вид выпуклых кривых и, следовательно, описываются уравнением Ленгмюра (1):

$$C_{\text{ад}} = C_{\infty} K_{\text{л}} C_{\text{р}} / (1 + K_{\text{л}} C_{\text{р}}), \quad (1)$$

где $C_{\text{ад}}$ – количество поглощенных катионов, C_{∞} – величина максимальной адсорбции Cu^{2+} , $\text{мМ} \cdot \text{кг}^{-1}$; $C_{\text{р}}$ – концентрация Cu^{2+} в равновесном растворе, $\text{мМ} \cdot \text{л}^{-1}$; $K_{\text{л}}$ – константа Ленгмюра, $\text{л} \cdot \text{мМ}^{-1}$.

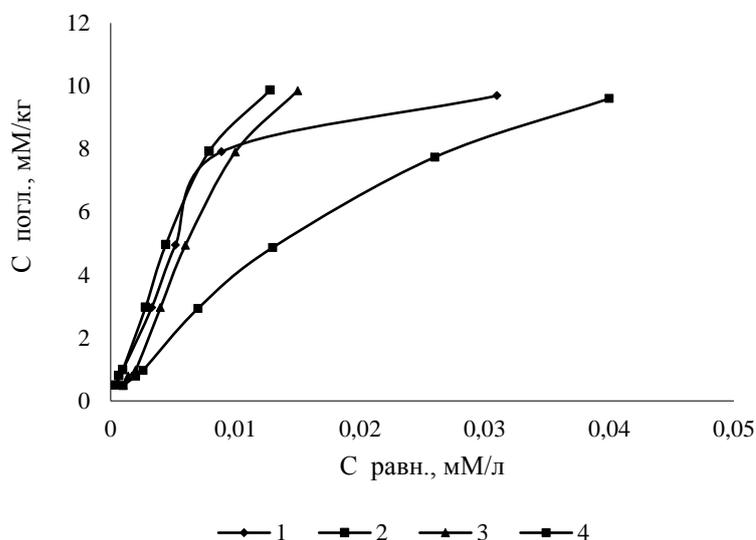


Рис.1. Изотермы адсорбции Cu^{2+} черноземом обыкновенным тяжелосуглинистым (1), черноземом южным тяжелосуглинистым (2), черноземом южным среднесуглинистым (3) и черноземом южным супесчаным (4) при внесении ее в форме нитратов

Значения параметров уравнения, рассчитанные из экспериментальных изотерм, представлены в таблице 2. Высокие значения коэффициентов корреляции ($r = 0.94-0.99$) свидетельствуют о хорошем соответствии экспериментальных изотерм данному уравнению адсорбции.

Таблица 2. Параметры адсорбции Cu^{2+} из растворов нитратных солей черноземами разного гранулометрического состава

| Объект исследования | C_{∞} , $\text{мМ} \cdot \text{кг}^{-1}$ | $K_{\text{л}}$, $\text{л} \cdot \text{мМ}^{-1}$ | R^2 |
|---|---|--|-------|
| Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый | 13.30 ± 1.30 | 93.72 ± 20.69 | 0.94 |
| Чернозем южный тяжелосуглинистый | 23.66 ± 3.54 | 58.25 ± 13.20 | 0.99 |
| Чернозем южный среднесуглинистый | 20.59 ± 9.16 | 54.54 ± 21.92 | 0.98 |
| Чернозем южный супесчаный | 19.01 ± 1.02 | 25.90 ± 2.36 | 0.99 |

В соответствии с полученными данными, по величинам констант прочности исследуемые почвы образуют следующий ряд: чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый \gg чернозем южный тяжелосуглинистый $>$ чернозем южный среднесуглинистый $>$ чернозем южный супесчаный. По величине максимальной адсорбции наблюдается следующая последовательность распределения адсорбентов: чернозем южный тяжелосуглинистый $>$ чернозем южный среднесуглинистый $>$ чернозем южный супесчаный $>$ чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый. Таким образом, эти две последовательности



различаются, а величины C_{∞} и K_L не коррелируют друг с другом. Следовательно, их значения определяются разными факторами.

Следует отметить, что величины C_{∞} имеют тесную отрицательную корреляцию с величинами ЕКО ($r = -0.88$). Эта взаимосвязь описывается экспоненциальным уравнением: $y = a \cdot \exp(-bx)$, где y соответствует C_{∞} , x – ЕКО, $a = 95.6$, $b = 0.48$ – эмпирические коэффициенты. Менее тесная корреляция существует между значениями C_{∞} и содержанием физической глины и ила во всех исследуемых образцах почв и пород: $r = 0.52$, в то же время связь между K_L и этими же компонентами слабая. Из этого следует, что на величину C_{∞} влияют, в основном, размеры частиц и связанная с этим удельная поверхность, а на прочность связи, характеризуемую величиной K_L , – в большей степени их химический и минералогический состав.

Подтверждением этого является довольно тесная корреляция между значениями K_L и содержанием физической глины ($r = 0.70$), и ила ($r = 0.72$) в черноземах разного гранулометрического состава. Еще более тесная корреляция существует между этими же переменными в черноземах южных ($r = 0.89$ для физической глины и $r = 0.91$ для ила).

В состав илистой фракции исследуемых почв входят, в основном, вторичные минеральные компоненты: глинистые минералы, коагели, оксиды железа и алюминия, аллофаны, моно- и поликремневые кислоты, а также органические и органоминеральные вещества (Минкина и др., 2004). Существенным отличием высокодисперсных фракций, выделенных из почв, является присутствие значительных количеств органического вещества в свободном состоянии и в форме органоминеральных соединений различной природы. Таким образом, можно предположить, что именно эти соединения обуславливают наблюдаемые различия в поглощательной способности исследуемых объектов. По мнению В.А. Холодова с соавторами (2014) для гумусовых горизонтов почв основным фактором, определяющим их сорбционную способность, является органическое вещество. При содержании органического вещества более 1%, органические составляющие коллоидов эффективно блокируют минеральные, и последние не функционируют как адсорбенты. С уменьшением в почве гумуса снижается прочность связи ионов Cu^{2+} с поверхностью почвенных частиц.

Выводы

Показаны различия в поглощении Cu^{2+} черноземами, различающимися по гранулометрическому составу. По величинам константы прочности меди с поверхностью твердых частиц исследуемые почвы образуют ряд: чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый \gg чернозем южный тяжелосуглинистый $>$ чернозем южный среднесуглинистый $>$ чернозем южный супесчаный. По величинам максимальной адсорбции меди они располагаются в другой последовательности: чернозем южный тяжелосуглинистый $>$ чернозем южный среднесуглинистый $>$ чернозем южный супесчаный $>$ чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый.

Установлена тесная обратная взаимосвязь между величинами максимальной адсорбции меди (C_{∞}) и ЕКО. Корреляционный анализ взаимосвязей C_{∞} и K_L с содержанием физической глины и ила в образцах почв показал, что на величину адсорбции Cu^{2+} влияют, главным образом, размеры частиц, а на прочность адсорбции в значительной степени – их химический и минералогический состав. Теснота связей на уровне разновидностей почв (черноземы южные, $r = 0.89-0.91$) выше, чем на уровне подтипов (черноземы обыкновенный и южный, $r = 0.70-0.72$). Важным фактором, определяющим прочность связи адсорбированных катионов Cu^{2+} исследуемыми сорбентами, является наличие органического вещества ($r = 0.76-0.88$).



Благодарности

Работа осуществлена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (№ МК-4015.2018.5) и Министерства образования и науки РФ (проект № 5.948.2017/ПЧ).

Литература

- Панин М.С., Сиромля Т.И. (2005) Адсорбция меди почвами Семипалатинского Прииртышья. *Почвоведение* **4**, 416-426.
- Качинский Н.А. (1958) Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Издательство: АН СССР, 193 с.
- Крыщенко В.С., Голозубов О.М., Колесов В.В., Рыбьянец Т.В. (2008) Базы данных состава и свойств почв. Ростов-на-Дону: РСЭИ, 145 с.
- Ладонин Д.В., Пляскина О.В. (2004) Изучение механизмов поглощения Cu (II), Zn (II) и Pb (II) дерново-подзолистой почвой. *Почвоведение* **5**, 537-545.
- Воробьева Л.А. (2006) Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 400 с.
- Шаймухаметов М.Ш. (1993) К методике определения поглощенных Са и Mg в черноземных почвах. *Почвоведение* **12**, 105-111.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв и грунтов М.: Агропромиздат, 416 с.
- Минкина Т.М., Статовой А.А., Крыщенко В.С. (2004) Механизмы поглощения свинца гранулометрическими фракциями чернозема обыкновенного. *Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естественные науки*, **4**, 83-88.
- Холодов В.А., Кирюшина А.В., Ярославцева Н.В., Фрид А.С. (2014) Связывание меди (II) необратимо сорбированными на каолините и свободными гуминовыми веществами. *Почвоведение*, **7**, 803-811.



УДК 631.81.036 (571.54)

КИНЕТИКА ТРАНСФОРМАЦИИ АЗОТА УДОБРЕНИЙ В АГРОЛАНДШАФТАХ ЗАБАЙКАЛЬЯ: КОНСТАНТА СКОРОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТЕНИЯМИ, РОСТА ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ И ПРЕВРАЩЕНИЙ В АЗОТНОМ БАЛАНСЕ

Будажапов Л.В.

ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства, Улан-Удэ, Российская Федерация
nitrolu@mail.ru

KINETIC OF NITROGEN FERTILIZERS TRANSFORMATION IN AGROLANDSCAPES OF
TRANSBAIKALIA: CONSTANT VELOCITY OF PLANT ABSORPTION, GROWTH OF SOIL
MICROORGANISMS AND TURNOVERS IN NITROGEN BALANCE

L. Budazhapov

Buryat State Research Agricultural Institute, Ulan-Ude, Russia

Annatation. The results of long-term investigations devote to kinetic assessment of nitrogen cycle transformation in soil-fertilizer-plant system were present. Conception of biokinetic assessment nitrogen transformation has been achieved due to obtaining velocity characteristics of nitrogen absorption and immobilization in cryogenic soils as well as kinetic activity of soils microorganisms.

Introduction.

Nowadays the importance of improved soil fertility and crop productivity facilitates to find efficient solution to the problem by estimating velocity of nitrogen transformation in specific and harsh soil-climatic conditions such as northern part of Central Asia. Accordingly, for specific with low fertility cryogenic soils, especially for nitrogen balance, kinetic parameters must be fundamental and main than quantities content. Due to such assessed to build a kinetic conception whilst a traditional assessment of approach cannot fully reveal the above-mentioned aspects (1,2,7).

Objects and methods.

The research is based on nitrogen transformation results obtained during the last two decades with the use of nitrogen stable isotope ^{15}N and statistic analysis. Investigations were held in the main soil-climatic zones of Transbaikalia. Our studies were carried out through model, greenhouse and micro field experiments using spring grain crops. In model investigations under temperature and humidity conditions controlled we estimated changes of nitrogen fertilizer absorption in the first and next 10 days by assessing the differences between constant (k) of growth velocity. In greenhouse and micro field experiments we studied nitrogen transformation by estimating its kinetic characteristics that followed a general scheme involving fertilizer free; application of phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer (P40K40); application of both nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) fertilizers. Among analytical methods the traditional agrochemical, soil sciences and microbiological analysis were used. In generalizing results such traditional statistical methods with mathematic modeling were intensively introduced in the experiments. The size of velocity constant (k) of the nitrogen transformation was determined by the use exponent equation. We proceed from the fact that the main distribution of the quantities obeys not the Gauss equation of normal distribution, but the Poisson curve of distribution (1,2). That is why, similar assessment was the main and key position in formed hypothesis and conception.



Results and discussion.

Given that a new assessment suggests revealing not only quantitative parameters of nitrogen uptake, but focusing specifically on kinetic characteristics, it will be possible to consider that speed of nitrogen absorption namely and velocity constant occurrence is more important than the rate of nitrogen content. The current analysis indicates that we deal with biokinetic model here.

According to the findings presented below, biological differences of grain crops are shown in absorption of nitrogen fertilizer and soil nitrogen. Among them oats is defined by the highest kinetic use independently of the soil fertility, and its velocity constant (k) reaches $k = 0.735$ per day and is higher than that of wheat and barley (table 1). The data shows powerful root system and deep penetration into fertility layer of soil profile, and better absorption of nitrogen, water and other nutrients. Accordingly, different kinetics of grain crop absorption is represented here for the first time.

It is known that higher immobilization of nitrogen fertilizer in soils is a positive factor in the cycle of nitrogen transformation (2-6,8). Due to this process the content of nitrogen respectively in soils increases. However, quantitative parameters of immobilization of nitrogen fertilizer in soils are defined as a basic feature excluding kinetic assessment of the process. After its last exposure we examined that kinetic parameters of soil microorganisms and their performance are a constituent part in the assessment of nitrogen transformation (2-5,8-10).

Table 1. Nitrogen velocity constant (k , day) of plants fertilizer absorption in cryogenic soils (greenhouse experiments)

| Type | Content of | Soil | k, day | | |
|---------------------|------------------|----------|--------|--------|-------|
| soils | N in soil, % | moisture | Wheat | Barley | Oats |
| Chest nut | 0.137 ± 0.04 | 60-70% | 0.674 | 0.673 | 0.735 |
| Black | 0.220 ± 0.02 | of full | 0.679 | 0.701 | 0.723 |
| Grey forest | 0.168 ± 0.08 | moisture | 0.544 | 0.518 | 0.612 |
| Black meadow | 0.433 ± 0.06 | capacity | 0.429 | 0.374 | 0.633 |

For the first time kinetic activity of soil microorganisms in immobilization of nitrogen fertilizer in cryogenic environments was assessed. Among groups of soil microorganisms Actinomycetes were identified for the highest kinetic activity than fungi, and their activity constant (k) in cryogenic soils was different and reached $k = 0.129$ in chestnut soil, $k = 0.165$ in grey forest soil and $k = 0.434$ per year in black meadow frozen soil (table 2).

Table 2. Constant (k) of microorganism activity and growth velocity in cryogenic soils (micro field experiments)

| Parameters of assessment | Chestnut soil n = 9 | Grey forest soil n = 10 | Black meadow soil n = 6 |
|--|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Fungi | |
| Quantity, 10^3/ g soil | 20.7 ± 1.9 | 9.17 ± 0.78 | 85.9 ± 4.82 |
| Correlation, $r \pm s_r$ | 0.40 ± 0.35 | 0.32 ± 0.35 | 0.21 ± 0.49 |
| k of growth velocity | 0.0004 per year | 0.003 per year | 0.0004 per year |
| k of activity | 0.011 per year | 0.001 per year ⁻¹ | 0.001 per year |
| | | Actinomycetes | |
| Quantity, 10^6/ g soil | 1.84 ± 0.49 | 2.11 ± 0.26 | 7.37 ± 0.31 |
| Correlation, $r \pm s_r$ | 0.84 ± 0.21 | 0.62 ± 0.29 | 0.92 ± 0.12 |
| k of growth velocity | 0.0014 per year | 0.002 per year ⁻¹ | 0.0004 per year |
| k of activity | 0.129 per year | 0.165 per year ⁻¹ | 0.434 per year |



Immobilization of nitrogen fertilizer was the highest by its kinetic activity in black meadow frozen soil. Hence, higher quantity of soil microorganisms is not eventually followed by higher similar immobilization of nitrogen. The results of correlation analysis definitely justify the new hypothesis. Smaller kinetic (k) activity of Actinomycetes in chestnut soils ($k = 0.129$ per year) provide with higher correlation ($r = 0.84 \pm 0.21$) and in contrast their highest kinetic (k) activity in grey forest soils ($k = 0.165$ per year) leads to a smaller degree correlation ($r = 0.62 \pm 0.29$) in relation to immobilization of nitrogen fertilizer in cryogenic soils (table 2). Compared to Actinomycetes kinetic (k) activity of soil fungi is very low and slow, independently of its amounts and soil fertility, thereby it reaches only $k = 0.001$ per year (table 2). The latter is driven by higher adaptation of Actinomycetes group to very harsh hydro-temperature regimes of cryogenic soils (2,4,7,10).

This almost certainly to emphasize that the attempts of assessing microorganism kinetic activity (k) may be important for build biokinetic conception of nitrogen transformation in harsh conditions of Transbaikalia and similar regions of Asia. Kinetic balance of nitrogen transformation among cryogenic soils was predominantly formed in grey forest soils, where constants (k) of speed nitrogen fertilizer absorption by grain crops and immobilization in cryogenic soils were higher than non-specified (table 3).

Such state of kinetic nitrogen balance relates to the same low constant (k) of velocity losses ($k = 0.067$ per day⁻¹) and the same higher constant (k) of speed absorption ($k = 0.723$ per day) in cryogenic soils (table 3). Kinetic balance of other soils is less positive and reaches its deficit. This can be seen from the comprehensive estimates mentioned above to make a final conclusion to biokinetic conception

Table 3. Kinetic balance of cycle nitrogen transformation in soil-fertilizer-plant systems

| Type | Constant (k) | of nitrogen | pool velocity, | day / day ⁻¹ |
|---------------------|-------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|
| soils | mineral | absorption | immobilization | non-specified |
| Chest nut | 0.867 day ⁻¹ | 0.673 per day | 0.449 per day | 0.255 per day |
| Black | 0.665 day ⁻¹ | 0.518 per day | 0.383 per day | 0.236 per day |
| Grey forest | 0.759 day ⁻¹ | 0.723 per day | 0.103 per day | 0.067 per day |
| Black meadow | 0.865 day ⁻¹ | 0.374 per day | 0.105 per day | 0.386 per day ⁻¹ |

Conclusion.

First presents results of long-term experiments on nitrogen transformation in cryogenic soils with application of stable nitrogen isotope (¹⁵N) and modeling as renewed efforts to make a biokinetic conception of nitrogen status in rigid climates of the northern part of Central Asia, namely in Transbaikalia. It uses a theory to investigate velocity characteristics of nitrogen pool change in cryogenic soil environments. The goal of theoretical background of nitrogen pool velocity transformation is to reveal modern approach to assessment of inherent nature cycle. In nitrogen cycle kinetic parameters were evaluated as the main processes of nitrogen ¹⁵N uptake and immobilization in terms of scaling with constant of growth velocity and microorganism performance being a key



position in nitrogen transformation. The results show a new possibility to assess nitrogen cycle through calculated velocity constant and revealed dynamic pattern of the main processes. The ongoing assessment enables us to formulate a new original hypothesis for theoretical kinetic model. This mathematical extrapolation of results allows to build a basis for theoretical simulation of nitrogen cycle and a more dynamic pattern of nitrogen pool changes.

References

1. Arkhincheev V.E., Budazhapov L.V. (2018). Nonlinear response on external field and nonlinear generalization of fluctuation-dissipation theorem for levy flights. Book edited by: Dr. Mahmut Rey Hanoglu [http:// dx.doi.org/10.5772/ intechopen. 78549](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78549). Nonlinear Systems - Modeling, Estimation and Stability. Chapter 7. ISBN 978-1-78923-405-3. P.129-144.
2. Budazhapov L.V. (2015). Biokinetic conception of nitrogen transformation in harsh climates of cryogenic soils in Central Asia. *Biosciences, Biotechnology Research Asia*. 12 (1), 287- 293.
3. Cookson W.R., Rowarts J.S., Cameron K.C. (2005). The effect of ammonium applied ¹⁵ N-labeled fertilizer leaching in a cultivated soil during winter. *Nutrient Cycle Agroecosystem*. 56 (2), 99-107.
4. Giessler D., Horwath W.R., Joergensen R.G., Ludwig B. (2010). Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms - A review // *Soil Biol. Biochem.* V.42. P. 2058-2067.
5. Jansson S.L., Person J., Stevenson F.J. (1982). Mineralization and immobilization of soil nitrogen. *Agronomy*, 22,29-252.
6. Jenkinson D.S., Poulton P.R., Johnston A.E., Powlson D.S. (2004). Turnover of nitrogen - 15-labelled fertilizer in old grassland // *Soil Sci. Soc. Am.J.* V.68. P.865-875.
7. Kogut B.M., Semenov V.M. (2014). Theoretical concepts about organic matter, humus, humic substances in soils and their adequate experimental determination // *Biogenic-abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems*. V Intern. Symp. Saint Petersburg: VVM Publishing Ltd., P.105-106.
8. Mahieu N., Olk D.S., Randal E.W. (2000). Accumulation of heterocyclic nitrogen in humified organic matter: A ¹⁵N -NMR study of lowland rice soils // *European J. Soil Sci.* V.51.P.379-389.
9. Petersen B.M., Jensen, L.S., Hansen S. (2005). CN-SIM: a model for the turnover of soil organic matter. II. Short - term carbon and nitrogen development. *Soil Biology and Biochemistry*. 37(5), P. 375-393.
10. Whalen J.K., Bottomley P.J., Myrold D.D. (2000). Carbon and nitrogen mineralization from light-and heavy-fraction additions to soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 32, 1354-1352.



УДК 631.4

ОСНОВНАЯ ОБРАБОТКА ПОЧВ: РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ И ВЛИЯНИЕ НА ЭМИССИЮ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ

Бучкина Н.П.¹, Зинченко С.И.², Рижия Е.Я.¹, Павлик С.В.¹, Хорн Р.³, Балашов Е.В.¹

¹ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

buchkina_natalya@mail.ru

²Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, Суздаль, Российская Федерация

zinchenkosergei@mail.ru

³Университет Киля, Киль, Германия

rhorn@soils.uni-kiel.de

NAME IN ENGLISH LANGUAGE SOIL TILLAGE: EFFECT ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND N₂O EMISSION FROM ORTHIC GREYZEMS

Buchkina N.P., Zinchenko S.I., Rizhiya E.Y., Pavlik S.V., Horn R., Balashov E.V.

¹Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

²Verhnevolzhsky Federal Agrarian Research Centre, Suzdal, Russia

³Kiel University, Kiel, Germany

Annotation: The aim of the study was to find out how soil tillage affects N₂O emission from Orthic Greyzems. The lowest fluxes were measured under deep tine cultivation or under shallow tine cultivation combined with deep ploughing. Conventional ploughing and shallow tine cultivation resulted in high fluxes due to soil structure degradation and increased soil bulk density.

Введение

Постоянное использование вспашки в традиционных системах земледелия может приводить к деградации структуры почвы и к большим потерям в органическом веществе в результате эрозии и минерализации (Martel, MacKenzie, 1980; Hussain et al., 1999). Беспашотная обработка почв, в свою очередь, может существенно изменять некоторые свойства почвы, влияющие на образование N₂O. Прямые измерения потока N₂O из почв и результаты лабораторных экспериментов показали, что влияние различных систем обработки почвы на выбросы парниковых газов в значительной степени зависит от исходных свойств почвы и климатических условий. В целом, на легких почвах в сухом климате нулевая и минимальная обработки почв не приводят к образованию большего количества N₂O по сравнению с обычной обработкой почвы. В то время как плохо аэрированные почвы во влажном климате выделяют больше N₂O, когда обычная отвальная обработка почвы заменяется на минимальную или «нулевую» (Choudhary et al., 2002; Chatskikh and Olesen, 2007; Ball et al., 2008). Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы выяснить, как четыре различные системы основной обработки почвы влияют на физические свойства почв и эмиссию N₂O из богатых органическими веществами суглинистых серых лесных почв Владимирской области в центральной части России.

Объекты и методы

Полевой эксперимент был заложен Владимирским сельскохозяйственным научно-исследовательским институтом на пахотной серой почве в 1986 году. В эксперименте использовались четыре различных способа основной обработки почвы: отвальная вспашка на глубину 20-22 см – О; мелкая (до 6-8 см) безотвальная обработка – М; глубокая (до 20-22 см)



безотвальная обработка – Г и сочетание мелкой безотвальной обработки с регулярной (один раз в 5 лет) глубокой вспашкой до 28-30 см – К.

Отбор образцов воздуха для измерения прямых потоков N_2O проводили методом закрытых камер. Лабораторный эксперимент с ненарушенными образцами почвы (диаметром 10 см и высотой 12 см), отобранными поздней осенью, проводился в течение 50 дней. В начале эксперимента дополнительный N наносили в виде минерального удобрения в половину обобранных образцов (KNO_3 , 90 кг N га^{-1}). Другую половину образцов оставляли без добавления N-удобрения. Все образцы инкубировали при постоянной температуре 22°C . Пробы воздуха отбирали 2-3 раза в неделю. Содержание воды в почве поддерживали на уровне 28-31%.

Концентрацию N_2O в образцах измеряли на газовом хроматографе, оснащённом детектором электронного захвата. Содержание доступное N (NO_3^- и NH_4^+) в почвах измеряли с помощью ионоселективных электродов.

Результаты и обсуждение

Органогенные горизонты почвы с различной обработкой содержали от 12 до 24 мг доступного азота на кг^{-1} почвы и от 24 до 26 г С кг^{-1} почвы. Наибольшей влажностью характеризовалась почва варианта М. Почва варианта Г содержала на 1% меньше влаги, а почва двух других вариантов были на 2% суше, чем почвы варианта М. Плотность сложения почвы (BD) в верхних 8-сантиметровых и нижних 4-сантиметровых слоях почвенных образцов сильно отличалась для почв вариантов М и Г, а для двух других вариантов разница между слоями была недостоверной.

Различия в BD и SWC привели к существенным различиям в доле почвенных пор, заполненных водой (WFPS). Для верхнего 8-сантиметрового слоя самые низкие величины WFPS были характерны для варианта Г, а самые высокие – для варианта М. Для нижнего 4-см слоя величина WFPS была примерно на 15% выше в почве варианта М по сравнению с почвами трех других вариантов. Наименьшее среднее значение WFPS в почве наблюдалось в почве варианта Г – 66,5%, для почвы вариантов О, М и К этот показатель составлял 79,1, 79,3 и 72,9%, соответственно.

В конце эксперимента количество доступного азота в почвах без добавления азота с минеральным удобрением составляло 15-25 мг N кг^{-1} почвы, в то время как почвы, в которые был добавлен дополнительный азот, содержали 70-90 мг N кг^{-1} почвы. Разница между вариантами была незначительной.

Самым низким кумулятивным потоком N_2O из почвы без внесения дополнительного N характеризовалась почва варианта М. Почва варианта О характеризовалась наибольшим кумулятивным потоком N_2O , который был в 3 раза выше, чем из почвы варианта М. Почвы вариантов М и Г выделяли меньше N_2O , чем почвы вариантов О и К.

Внесение минерального удобрения в почву привело к увеличению эмиссии N_2O из почвы всех вариантов опыта. Наиболее существенный эффект применения N-удобрения был выявлен на почвах вариантов О и М. В первом случае кумулятивный поток N_2O увеличился на $585 \text{ г } N_2O\text{-N м}^{-2}$, а во втором - на $462 \text{ г } N_2O\text{-N м}^{-2}$ по сравнению с неудобренными почвами. Для почв вариантов Г и К поток N_2O после применения N-удобрения увеличился, соответственно, на 223 и 218 г $N_2O\text{-N м}^{-2}$.

Conen et al. (2000) показали для влажных почв Шотландии, а также в наших собственных экспериментах с супесчаными почвами на северо-западе России (Buchkina et al., 2006), что 10 мг доступного азота на кг почвы было достаточно для возникновения высоких потоков N_2O из почв, если другие свойства почвы (доля пор, заполненных водой и содержание С в почве)



были благоприятны для развития процесса денитрификации. В нашем эксперименте почвы содержали более 10 мг кг^{-1} почвы доступного азота на момент начала эксперимента, так что различия в эмиссии N_2O вряд ли были связаны с различиями в содержании доступного азота.

Обработка почвы является одним из основных факторов, влияющих на плотность сложения сельскохозяйственных почв. В нашем эксперименте почва варианта М имела наиболее высокую плотность сложения, что привело к высоким величинам WFPS почвы, особенно в нижнем 4-сантиметровом слое, где почва была насыщена водой, несмотря на то, что влажность этой почвы не сильно отличалась от влажности трех других почв. Это, скорее всего, являлось основной причиной, по которой почва варианта М выделяла большее количество N_2O .

Обработка почвы влияет не только на плотность сложения почвы, но также на формирование почвенных агрегатов и качество почвенных агрегатов. Е. Балашов и Н. Бучкина (2011) показали для тяжелого суглинистого чернозема, что обычная вспашка в течение 60 лет приводила к потерям в больших фракциях водостойких агрегатов и к потерям органического вещества почвы из водостойких агрегатов всех фракций. В нашем лабораторном эксперименте почвы варианта О характеризовались наибольшими эмиссиями N_2O , несмотря на то, что их начальная плотность сложения была не намного выше, чем, скажем, почвы варианта К. Причиной этого может быть распад агрегатов почвы во время лабораторного эксперимента в этом варианте опыта.

Для разных почв было показано, что отсутствие обработки почвы или уменьшение обработки почвы часто приводят к накоплению SOC или увеличению количества легко окисляемых органических веществ в верхнем слое почвы. В условиях высокой влажности и на тяжелых почвах это может привести к более высоким эмиссиям N_2O из почв без обработки или может не оказать существенного влияния на эмиссию N_2O в сухом климате.

Для суглинистых серых почв Владимирской области России, изученных в нашем эксперименте, наименьшие эмиссии N_2O после применения N-удобрения были измерены из почв вариантов Г и К. Можно предположить, что безотвальная обработка почвы, по сравнению с обычной вспашкой, не приводит к ухудшению структуры почвы и улучшает пористость почвы, в то время как глубокая обработка почвы или регулярная глубокая вспашка нижних слоев почвы поддерживают плотность сложения почвы на более низком уровне, снижая образование N_2O в этой почве.

Выводы

Суглинистые серые почвы Владимирской области России богаты почвенным органическим веществом и доступным азотом. Между четырьмя различными системами обработки почвы, сравниваемыми в этом исследовании, самые низкие эмиссии N_2O были характерны для почв с глубокой (20-22 см) безотвальной обработкой или в варианте, когда мелкая (6-8 см) безотвальная обработка сочеталась с регулярной (один раз в 5 лет) глубокой вспашкой до 28-30 см. Обычная отвальная вспашка до 20-22 см, а также мелкая безотвальная обработка до 6-8 см приводили к высоким эмиссиям N_2O из-за ухудшения структуры почвы или увеличения плотности сложения почвы. При выборе между различными системами обработки почвы в этом регионе лучше избегать тех, которые приводят к увеличению плотности сложения почвы в верхнем слое или к деградации структуры почвы.

Благодарность

Исследования физических свойств почв были поддержаны грантом DAAD.



Литература

- Balashov E., Buchkina N. (2011). Impact of short- and long-term agricultural use of chernozem on its quality indicators. *International Agrophysics* **25(1)**, 1-5.
- Ball, B. Crichton C., I., Horgan G. W. (2008). Dynamics of upward and downward N₂O and CO₂ fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence. *Soil & Tillage Research* **101**, 20-30.
- Buchkina, N.P., Balashov E.V., Rizhiya E.Y., Smith K.A. (2006). Nitrous oxide emissions from a light agricultural soil of Northwestern Russia in relation to applied N fertilizer and manures. Materials of the International conference of ISTRO, September 2006, Kiel, 19-20.
- Chatskikh, D., Olesen J. E. (2007). Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil & Tillage Research* **97 (1)**, 5-18.
- Choudhary, M. A., Akramkhanov A. A., Saggar S. (2002). Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: tillage effects, spatial and seasonal variability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **93**, 33-43.
- Hussain I., Olso K. R., Ebelhar S. A. (1999). Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. *Soil Science Society of American Journal* **63**, 1335-1341.
- Martel, Y.A., MacKenzie A. F. (1980). Long-term effects of cultivation and land use on soil quality in Quebec. *Canadian Journal of Soil Science* **60**, 411-420.



УДК631.461, 631.42

МИКРОБНОЕ ПРОДУЦИРОВАНИЕ CO₂ ПОЧВАМИ ПРИРОДНЫХ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

Васильченко А.В.¹

Институт X-BIO ТюмГУ, Тюмень, Российская Федерация
a.v.vasilchenko@utmn.ru

MICROBIAL PRODUCTION OF CO₂ BY SOIL NATURAL AND AGRICULTURAL ECOSYSTEMS
Vasilchenko A.V.¹
Institute X-BIO, Tyumen State University, Tyumen, Russia

Annotation: A study was made of the effect of agricultural use on the microbial production of CO₂ by soils and the resistance of the microbial community to agricultural loads. It is shown that the contribution of arable soil to the production of CO₂ is significantly lower (7.3-9.6 times) compared with natural analogues. Reduced microbial biomass. QR values did not reveal significant impairments of resistance in the microbial community of natural and agrocenoses.

Введение

Уже на протяжении нескольких столетий особое внимание уделяется проблемам изменения климата. Увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов, среди которых диоксид углерода играет главную роль, является одним из ведущих факторов, определяющих климатические процессы (Неунылов, Хавкина, 1968; Пуртова и др., 2013). Источником парниковых газов является не только техногенная деятельность человека, но и естественные микробиологические процессы, протекающие в почве, а именно их дыхание. В целом дыхание почвы есть образование двуокси углерода двумя основными составляющими: почвенными микроорганизмами (за счет трансформации органического вещества) и корнями растений. Активность почвенных микроорганизмов является важным фактором, который необходимо учитывать при оценке потенциала биосферы в регулировании уровня концентрации CO₂ в атмосфере. Вклад микроорганизмов в дыхание почвы составляет по разным оценкам в среднем от 50 до 90 % (Авксентьев, 2011; Заварзин, Кудеяров, 2006; Степанов, 2011; Bowden et. al., 1993; Tate et. al., 1993; Евдокимов и др., 2010).

Природная эмиссия газов регулирует сбалансированность экосистем, а чрезмерное и бездумное вмешательство человека приводит к глобальным изменениям объемов и режимов поступления парниковых газов в атмосферу. Агроекосистемы являются экосистемами с наиболее динамичным балансом органического вещества. Потеря углерода в пахотных почвах при нерациональном использовании превращает агроэкосистему в источник парникового газа – диоксида углерода, а повышение продуктивности агроэкосистем или восстановление многолетней растительности на пахотных почвах способствует связыванию атмосферного CO₂ и смягчению парникового эффекта (Авксентьев, 2011; Ларионова и др., 2010). В связи с этим большой интерес представляют данные по изучению влияния сельскохозяйственного использования почв на эмиссию диоксида углерода.

Цель работы – определение интенсивности, скорости выделения диоксида углерода естественными и антропогенно-преобразованными экосистемами; оценка устойчивости микробного сообщества при агроиспользовании почв.



Объекты и методы

Объектами исследования послужили серые почвы естественных (березовые насаждения) и агроценозов в севооборотах (черный пар, горох, бессменный посев твердой пшеницы) Ишимского района Тюменской области. Все участки находятся в условиях богары. Каждая точка представляла собой ровную площадку (1 × 1 м), на которой методом «конверта» отбирали почвенные образцы с глубины 0-10 см (растительную подстилку удаляли).

До начала микробиологических измерений почву просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Увлажняли до 60 % от полной влагоемкости (ПВ) и инкубировали при температуре 22° С в течение 7 суток в полиэтиленовых пакетах. Определение базального дыхания микроорганизмов почвы (после удаления из нее корней) проводили из предынкубированных образцов с использованием инструментов газовой хроматографии.

Скорость базального (микробного) дыхания определяли по скорости выделения CO₂ почвой за 24 часа ее инкубации при 22° С и 60 % ПВ. Скорость базального дыхания выражали в мкг CO₂-С/г сухой почвы в час. Микробное (базальное) дыхание почвы (без корней), определяемое в контролируемых лабораторных условиях (оптимальная влажность, температура, нарушенная структура), является потенциальным в отличие от актуального (полевые условия) (Иващенко и др., 2014; Евдокимов, 2018).

Параллельно определяли углерод микробной биомассы по формуле

$$C_{\text{мик}} (\text{мкг С/г почвы}) = 56 \times \text{СИД} + 0,37,$$

где СИД – субстрат-индуцированное дыхание (Евдокимов, 2018).

СИД основано на измерении первоначального максимального выделения CO₂ из почвы, обогащенной глюкозой в интервале не превышающем шести часов (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева и др., 2011). Навеску почвы (5 г) помещали во флакон (объем 100 мл), добавляли раствор глюкозы (0,1 мл/г почвы, 10 мг/г почвы), герметично закрывали и фиксировали время. Обогащенную глюкозой почву инкубировали (3 - 4 ч при температуре 22° С), затем отбирали пробу воздуха из флакона и анализировали на газовом хроматографе. Скорость СИД выражали в мкг CO₂-С на грамм сухой почвы в час.

Измерения БД и СИД были выполнены в шести кратной повторности. Результаты измерений выражены как среднее ± стандартное отклонение.

Для характеристики степени нарушения устойчивости микробного сообщества и экосистемы в целом рассчитывали коэффициент дыхательной активности микроорганизмов (QR) как отношение БД/СИД = QR (Blagodatskaya, Kuzyakov, 2013; Благодатская и др., 2016; Ананьева, 2003).

Результаты и обсуждение

В эмиссии CO₂ почвой весомую долю занимает продуцирование этого газа за счет микробной деятельности. Как показали результаты исследований общее микробное продуцирование CO₂ было максимальным в почвах естественных ценозов и составило 34,1±0,22 мкг CO₂-С/г в час (рис.1). Под влиянием пахотного использования базальное (микробное) дыхание почв заметно снижается и в ряду черный пар – горох – бессменный посев твердой пшеницы составило 4,69±0,09, 4,59±0,20 и 3,54±0,05 мкг CO₂-С/г в час соответственно.

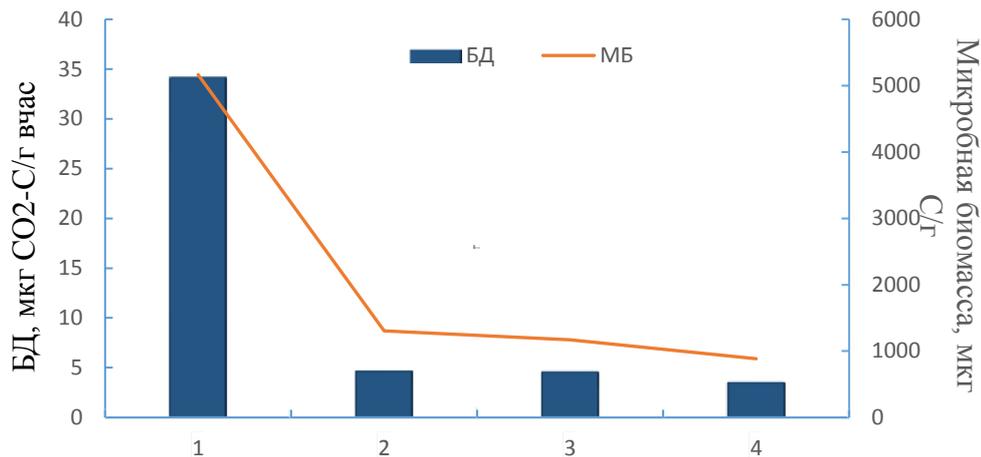


Рис.1. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование CO₂ (базальное дыхание) почвами природных и сельскохозяйственных экосистем: 1 – контроль (березовые насаждения), 2 – черный пар, 3 – горох, 4 – бессменный посев твердой пшеницы

Причиной резкого снижения дыхательной активности являются количественные потери микробной биомассы ($S_{\text{мик}}$ или МБ) в обрабатываемых почвах. По сравнению с естественным аналогом (5164 мкг С/г) содержание углерода иммобилизованного в микробной биомассе в почвах пахотных экосистем снизилось в 3,9, 4,4 и 5,8 раза (рис.1). И хотя содержание $S_{\text{мик}}$ в пахотных почвах резко уменьшается их функционирование можно считать сбалансированным. Так согласно классификации Гавриленко и др. (2011) исследуемые почвы характеризуются высоким (контроль, черный пар, горох) и средним (бессменный посев твердой пшеницы) содержанием микробной биомассы. Между содержанием $S_{\text{мик}}$ и БД выявлена положительная, очень сильная корреляционная взаимосвязь ($y=135,65x+538,45$, $R^2=0,9972$).

Таким образом, вклад исследуемых пахотных почв в продуцировании CO₂ значительно ниже по сравнению с их естественными аналогами. О том, что на современном этапе дыхание агропочв ниже эмиссии CO₂ из почв естественных экосистем указывается и в работах (Ларионова и др., 2002; Кудеяров, Курганова, 2005; Авксентьев, 2011).

Утверждение, что пахотные земли являются источником CO₂, более справедливо для вновь распаханых почв, когда в результате интенсивной минерализации органического вещества почв накопленный $S_{\text{орг}}$ через некоторое время оказывается в атмосфере (Кудеяров и др., 1995; Кудеяров, 2015).

Для оценки состояния, степени нарушения устойчивости микробного сообщества и экосистемы в целом рассчитывали коэффициент дыхательной активности QR (табл.1).

Таблица 1. Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине коэффициента дыхательной активности

| Объект исследования | $QR = \text{БД}/\text{СИД}$ | $QR_{\text{агро}}/QR_{\text{ест. почва}}$ |
|----------------------------------|-----------------------------|---|
| Контроль | 0,37 | - |
| Черный пар | 0,20 | 0,54 |
| Горох | 0,22 | 0,59 |
| Бессменный посев твердой пшеницы | 0,22 | 0,61 |

В почвах под паром полученные значения коэффициента дыхательной активности указывают на отсутствие нарушений в качественном и количественном составе почвенной



биоты, на стабильное и благоприятное состояние микробного сообщества. Незначительные сдвиги (слабые нарушения) отмечены в почвах под монокультурами (твердая пшеница, горох), где $QR = 0,22$. Наиболее высокие значения $QR (0,37)$, свидетельствующие также о более высоких темпах минерализационных процессов, были характерны для серых почв под березовыми насаждениями, но это является типичным для данных почв. Кроме того, относительный коэффициент микробного сообщества, определяемый как отношение $QR_{агро}/QR_{ест.почва}$, также свидетельствует об отсутствии степени нарушения в микробном сообществе исследуемых локусов.

Выводы

Максимальные потоки диоксида углерода обнаружены в почвах естественных ценозов. Вклад пахотных почв в продуцировании CO_2 значительно ниже (в 7,3-9,6 раза) по сравнению с их естественными аналогами. Использование почвы под пашню приводит к снижению микробной биомассы, но ее содержание продолжает характеризоваться как высокое и среднее (бессменный посев твердой пшеницы). Рассчитанный коэффициент дыхательной активности значительных нарушений устойчивости в микробном сообществе естественных и агроценозов не выявил.

Литература

- Авксентьев, А.А. Эмиссия парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) черноземом обыкновенным Каменной степи : автореферат дис. ... кандидата биологических наук : 03.02.13 / Авксентьев А.А.; [Место защиты: Воронеж. гос. ун-т]. - Воронеж, 2011. - 23 с.
- Ананьева Н.Д. (2003) Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. - М.: Наука, 223 с.
- Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. (2011) Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания. *Почвоведение*, **11**, 1327-1333. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17057117>.
- Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В. (2016) Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 243 с.
- Гавриленко, Е.Г., Сусьян, Е.А., Ананьева, Н.Д., Макаров, О.А. (2011). Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья. *Почвоведение*, **10**, 1231-1245. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16893025>.
- Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмитт М., Лопес де Гереню В.О., Бан М. (2010) Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO_2 из почвы методом субстрат-индуцированного дыхания. *Почвоведение*, **3**, 349-355. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13725462>.
- Евдокимов, И. В. (2018). Методы определения биомассы почвенных микроорганизмов. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, **3(3)**, 1-20. DOI 10.21685/2500-0578-2018-3-5.
- Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. (2006) Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России. *Вестник Российской академии наук*, **76(1)**, 14-29. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9182537>.
- Ивашенко, К. В., Ананьева, Н. Д., Васенев, В. И., Кудеяров, В. Н., Валентини, Р. (2014). Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область). *Почвоведение*, **9**, 1077-1077. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21803593>.
- Кудеяров В.Н., Курганова И.Н. (2005) Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, моделирование, общие оценки. *Почвоведение*, **9**, 1112-1121.



- Кудеяров В.Н., Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А., Кузнецова Т.В., Тимченко А.В. (1995) Оценка дыхания почв России. *Почвоведение*, **1**, 33-42.
- Кудеяров В.Н. (2015) Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России. *Почвоведение*, **9**, 1049. DOI: 10.7868/S0032180X15090087.
- Ларионова А.А., Розанова Л.Н., Евдокимов И.В., Ермолаев А.М. (2002) Баланс углерода в естественных и антропогенных экосистемах на серых лесных почвах. *Почвоведение*, **2**, 177-185.
- Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. (2010) Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата. *Почвоведение*, **2**, 186-195. <https://elibrary.ru/item.asp?id=13725434>.
- Неунылов Б.А., Хавкина Н.В. (1968) Изучение скорости разложения и процессов превращения в почве органического вещества, меченного С14. *Почвоведение*, **2**, 103-108.
- Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Семаль В.А., Комачкова И.В. (2013) Эмиссия углекислого газа из почв природных и антропогенных ландшафтов юга Приморья. *Фундаментальные исследования*, **1(3)**, 585-589. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30990>.
- Степанов А.Л. (2011) Микробная трансформация парниковых газов в почвах. М.: ГЕОС, 192 с.
- Anderson J. P. E., Domsch K. H. A. (1978). Physiological Method for the Quantitative Measurement of Microbial Biomass in Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **10(3)**, 215-221. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
- Bowden R.D., Nadelhoffer K.J., Boone R.D., Melillo J.M., Garrison J.B. (1993) Contributions of above ground litter, below ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can J For Res*, **23**, 1402-1407. doi.org/10.1139/x93-177.
- Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. (2013). Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology & Biochemistry*, **67**, 192-211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.024>.
- Tate K.R., Ross D.J., O'Brien B.J., Kelliher F.M. (1993) Carbon storage and turnover, and respiratory activity, in the litter and soil of an old-growth southern beech (*Nothofagus*) forest. *Soil Biol. Biochem*, **25**, 1601-1612. [doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90016-5](http://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90016-5).



УДК 582.282.23, 631.466.15

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДРОЖЖЕВЫХ ГРИБОВ В ПОЧВАХ ЮЖНОГО ВЬЕТНАМА (НА ПРИМЕРЕ БИОГЕОЦЕНОЗОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА КАТ ТЬЕН)

Глушакова А.М.¹, Максимова И.А.¹, Качалкин А.В.^{1,2}, Морозова А.И.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
glushakova.anya@yandex.ru

²Всероссийская коллекция микроорганизмов (ВКМ), Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН, Пушкино, Российская Федерация

DISTRIBUTION FEATURES OF YEASTS IN THE SOILS OF SOUTH VIETNAM (ON THE EXAMPLE OF THE BIOGEOCENOSSES OF THE NATIONAL PARK CAT TIEN)

Glushakova A.M.¹, Maksimova I. A.¹, Kachalkin A.V.^{1,2}, Morozova A.I.¹

¹Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²All-Russian Collection of Microorganisms (VKM), G.K.Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms RAS, Pushchino, Russia

Annotation: The yeast communities of tropical soils of two biotopes in monsoon tropical forest were studied in the specially protected natural territories of the National Park Cat Tien. It was possible to establish that the distribution of yeasts in the profile of studied soils differed markedly. Of particular interest was the isolation from the tropical soils the pedobiont species *Saitozyma podzolica*, which is regularly found in sod-podzolic, gray forest soils.

Введение

Почвенный покров представляет собой сложную полифункциональную открытую систему, постоянным и обязательным компонентом которой являются микробные сообщества. Они играют ключевую роль в круговороте веществ в природе и определяют состояние других компонентов экосистемы (Dobrovolskaya et al., 2015). Анализ разнообразия различных групп почвенных микроорганизмов является основой для понимания процессов формирования и функционирования экосистем в целом.

Мицелиальные грибы в почвах тропиков отличаются высоким разнообразием. Наряду с космополитными видами, в тропических почвах присутствуют и стенобионтные уникальные виды (McKenzie, 2001; Mueller, Schmit, 2007). Дрожжевые грибы в отличие от мицелиальных представляют собой внетаксономическую группу преимущественно одноклеточных микромицетов, утративших мицелиальное строение. Они являются обязательным компонентом всех природных сообществ, в том числе и почвы. Почвенные дрожжи участвуют в процессах минерализации, в поддержании структуры почвы и трансформации органического вещества, стимулируют рост растений, осуществляют контроль фитопатогенов. Несмотря на накопленные к настоящему времени знания об особенностях почвенных дрожжевых сообществ, многие аспекты формирования, развития и трансформации дрожжевых комплексов в почве остаются мало или вообще не изученными. Сведений об их видовом разнообразии в почвах тропиков значительно меньше, по сравнению с накопленными за многие годы данными о почвенных дрожжевых сообществах умеренных и северных широт (Yurkov, 2018). В связи с этим было проведено исследование почв тропического леса на территории Южного Вьетнама. Целью нашего исследования было изучение почвенных дрожжевых грибов по всему почвенному профилю двух типов почв.



Образцы почвы, растительного опада и корней отбирали в ноябре 2016 года на территории Национального парка Кат Тьен. Всего было проанализировано 29 образцов почвы, опада и корней в двух биотопах. Характеристика биотопов, в которых были отобраны образцы, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика исследованных биотопов

| Площадка | Биотоп | Почва |
|---------------------------------|--|--|
| «Приречная» (пойма) | Пойменный участок на берегу р. Донг Най, рельеф пологий со слабо выраженным микрорельефом <i>Dipterocarpus alatus</i> , <i>Lagestroemia calyculata</i> , <i>Irvingia malayana</i> , пятна <i>Aspidistra</i> | аллювиальная малогумусная слабообразованная супесчаная на аллювиальных отложениях, подстилаемых глинами и базальтами |
| «Диптерокарпус» (водораздел) | Вершина сланцевой гряды <i>Dipterocarpus turbinatus</i> , <i>Shorea roxburghii</i> , <i>Swintonia floribunda</i> , травянистая растительность с проективным покрытием 50 %, фон – папоротник <i>Taenitis blechnoides</i> | бурая ферраллитная глинистая с признаками оглеения на базальтах |

Образцы почвы отбирали послойно с шагом 10 см до глубины 140 см на участке «Приречная» и 110 см на участке «Диптерокарпус». Почву, корни и подстилку анализировали в течение недели после отбора, сохраняя их в холодильнике при температуре 5 °С. Из каждого образца отбирали 3 навески массой 1 г, помещали в пробирки и заливали стерильной водой для получения разведения 1:10 для опада, 1:20 – для корней и 1:5 для почвы. Суспензии обрабатывали на вортексе (MultiReax, Heidolph, Germany) в течение 15 минут со скоростью 2000 об/мин. Полученную суспензию в двукратной повторности высевали на глюкозо-пептонную-дрожжевую среду (глюкоза 20 г/л, пептон 10 г/л, дрожжевой экстракт 5 г/л, агар 20 г/л) с добавлением левомицетина (500 мг/л) для предотвращения роста бактерий. Посевы инкубировали при комнатной температуре 5–7 суток. Выросшие колонии дрожжей с помощью бинокулярной лупы разделяли на морфологические типы и подсчитывали число колоний каждого типа. Представителей каждого типа колоний выделяли в чистую культуру. Культуры дрожжей идентифицировали по морфологическим и физиологическим признакам (Kurtzman et al., 2011) и с помощью анализа нуклеотидных последовательностей D1/D2 региона 26S (LSU) рДНК. Видовую идентификацию дрожжевых грибов проводили на основе анализа нуклеотидных последовательностей D1/D2 доменов региона 26S (LSU), а также, при необходимости, ITS1-5.8S-ITS2 региона рДНК. Выделение ДНК, проведение ПЦР осуществляли по описанной ранее методике (Глушакова с соавт., 2016). Для амплификации интересующего нас региона рДНК использовали праймеры: ITS1f (5'- CTT GGT CAT TTA GAG AAG TA) и NL4 (5'- GGT CCG TGT TTC AAG ACG G). Секвенирование ДНК проводили с использованием праймера NL4 и/или ITS1f на секвенаторе AppliedBiosystems 3130xl Genetic Analyzer в Научно-производственной компании «Синтол» (Москва). Видовую идентификацию проводили, используя данные генбанка NCBI (ncbi.nlm.nih.gov) и базы данных MycoID (www.mycobank.org). Для каждого исследованного образца определяли общую численность дрожжей и относительное обилие каждого вида.



Результаты и обсуждение

Численность дрожжевых грибов в обоих биотопах закономерно уменьшалась в ряду опад-ризосфера-почва (рис. 1). Распределение дрожжевых грибов по профилю исследованных почв заметно различалось. Так, на площадке «Диптерокарпус» дрожжи были встречены на глубине до 40-50 см, а на площадке «Приречная» – до 130-140 см (рис. 2). Выявленные различия в распределении дрожжевых грибов по профилю исследованных почв можно объяснить разными типами почв на площадках. Площадка «Приречная», в отличие от площадки «Диптерокарпус», характеризовалась песчаной почвой, где происходит беспрепятственный перенос клеток дрожжей в глубокие горизонты. В почве на глинистых сланцах такой процесс затруднён, а, следовательно, и глубина обнаружения дрожжевых клеток заметно меньше.

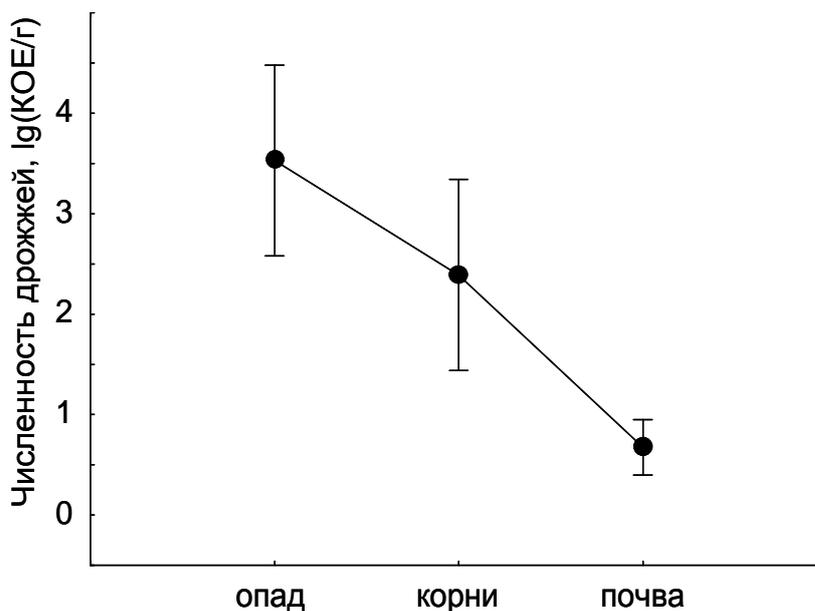


Рис. 1. Средние значения численности (lg(COUE/г)) дрожжей на различных типах субстратов.

Из всех исследованных образцов почвы, опада и корней было выделено 8 видов дрожжевых грибов: 5 аскомицетовых и 3 базидиомицетовых вида (табл. 2). Такое же число видов в среднем характерно для почв лесных биогеоценозов умеренной полосы. Однако в отличие от лесных почв, где доля базидиомицетовых дрожжей превышает 90 %, в исследованных тропических почвах их доля составила около 40 %.

В качестве доминанта в двух исследованных почвах выступал педобионтный вид *Saitozyma podzolica*. В аллювиальной почве на площадке «Приречная» субдоминантом являлся *Filobasidium chernovii* (11 %), а остальные виды были минорными компонентами сообщества. В качестве субдоминантов на площадке «Диптерокарпус» были встречены виды *Aureobasidium pullulans* (20 %), *Readeriellipsoidis fuscoporiae* (18 %) и *Candida akabanensis* (10 %). На площадке «Приречная» дрожжи *F. chernovii* и *S. podzolica* были выделены из слоев, глубина которых более 80 см. На площадке «Диптерокарпус» дрожжи глубже 50 см встречены не были. Таким образом, на разных площадках дрожжевые почвенные комплексы были сформированы разными видами за исключением общего доминанта. В обеих исследованных почвах максимальное разнообразие дрожжевых грибов было зафиксировано в поверхностном слое почвы и опаде. Большинство видов, которые были встречены в



поверхностных почвенных слоях и опаде (*Aureobasidium pullulans*, *Candida akabanensis*, *Hannaella sp.* и др.), ни разу не выделялись из глубинных слоев почвы. В то же время, вид *F. chernovii* встречен нами был только в глубинных слоях почвы. Исключение составляют дрожжи *S. podzolica*, на площадке «Приречная» этот вид был представлен по всему профилю почвы.

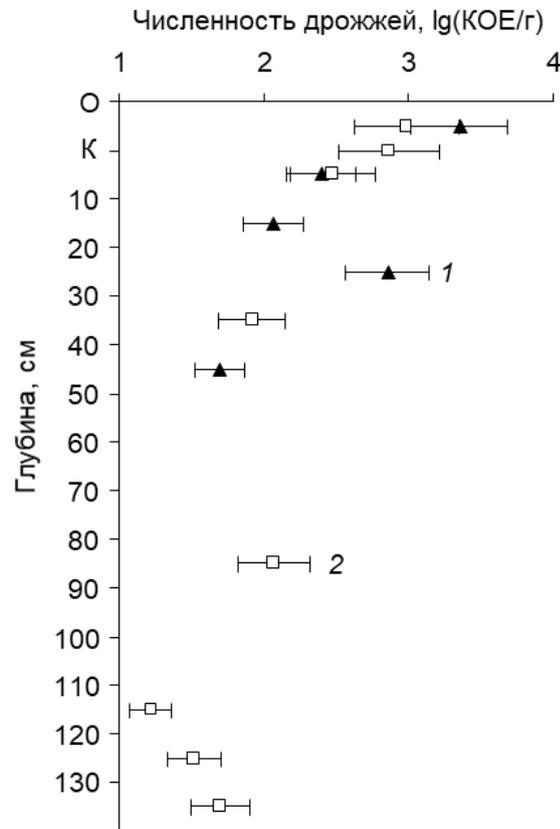


Рис. 2. Распределение дрожжей по профилям исследованных почв:
1 – «Диптерокарпус», 2 – «Приречная»

Таблица 2. Относительное обилие (%) видов дрожжевых грибов, выделенных из тропических почв разных биотопов: 1 – «Диптерокарпус», 2 – «Приречная»

| Виды дрожжей | 1 | 2 |
|---------------------------------------|-------|-------|
| <i>Aureobasidium pullulans</i> | 20,00 | - |
| <i>Candida akabanensis</i> | 10,00 | - |
| <i>Candida endomichidarum</i> | - | 3,13 |
| <i>Filobasidium chernovii</i> | - | 10,71 |
| <i>Saitozyma podzolica</i> | 51,70 | 79,91 |
| <i>Hannaella sp.</i> | - | 3,13 |
| <i>Readeriellipsoidis fuscoporiae</i> | 18,30 | - |
| <i>Schwanniomyces polymorphus</i> | - | 3,13 |



Отдельно стоит отметить, что наибольшие показатели частоты встречаемости этого вида отмечались ранее для зональных почв умеренных широт (Чернов, 2013; Botha, 2006; Yurkov, 2018). Для почв Вьетнама обнаружение данного вида описывается впервые.

Выводы

В результате изучения дрожжевых сообществ тропических почв двух биотопов муссонного тропического леса на особо охраняемых природных территориях Южного Вьетнама Национального парка Кат Тьен удалось установить, что распределение дрожжевых грибов по профилю исследованных почв заметно различалось. Так, на площадке «Диптерокарпус» (бурая ферраллитная почва) дрожжи на глубине, превышающей 40-50 см, обнаружены не были, а на площадке «Приречная» – встречались практически по всему профилю вплоть до глубины 130-140 см, что объясняется особенностями профилей этих почв. Разнообразие дрожжевых грибов в исследованных почвах было невелико. Всего из всех образцов почвы, опада и корней было выделено 8 видов дрожжевых грибов, 5 аскомицетовых и 3 базидиомицетовых вида. Такое же число видов в среднем характерно для почв лесных биогеоценозов умеренной полосы. Однако в отличие от лесных почв умеренной зоны, где доля базидиомицетовых дрожжей превышает 90 %, в исследованных тропических почвах их доля составила около 40 %. Особый интерес представляет выделение из тропических почв педобионтного вида *Saitozyma podzolica*, который регулярно встречается в дерново-подзолистых, серых лесных почвах.

Литература

1. Глушакова А.М., Качалкин А.В., Максимова И.А., Чернов И.Ю. (2016) Дрожжи в млечном соке *Hevea brasiliensis*. *Микробиология*. Т. 85, № 4, 466-471.
2. Чернов И.Ю. (2013) Дрожжи в природе. М.: Товарищество научных изданий КМК, 336 с.
3. Botha A. (2006) Yeasts in soil. *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts. The Yeast Handbook*. Eds. Rosa C.A., Peter G. Springer, 2006, 221-241.
4. Dobrovolskaya T.G., Zvyagintsev D.G., Chernov I. Yu., Golovchenko A.V., Zenova G.M., Lysak L.V., Manucharova N.A., Marfenina O.E., Polyanskaya L.M., Stepanov A.L., Umarov M.M. (2015) The role of microorganisms in the ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*, V. 48, № 9, 959-967.
5. Kurtzman C.P., Fell J.W., Boekhout T. (Eds.) (2011) *The Yeasts, a taxonomic study*, 5th ed. / New York: Elsevier, 2080 p.
6. McKenzie E.C. (2001) Fungi Anamorphici in Australasia. *Australian Systematic Botany*. № 14, 485-500.
7. Mueller G.M., Schmit J.P. (2007) Fungal biodiversity: what do we know? What can we predict. *Biodiversity and Conservation*. V. 16, 1-5.
8. Yurkov A.M. (2018) Yeasts of the soil – obscure but precious. *Yeast*. V. 35, № 5, 369-378.



УДК 582.28; 595.796

ГНЕЗДОСТРОИТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МУРАВЬЕВ КАК ФАКТОР ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ

Голиченков М.В.¹, Максимова И.А.¹, Закалюкина Ю.В.¹, Дымова А.А.¹, Чурилина А.Е.², Кирюшин А.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
affen@mail.ru

²ФГБНУ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева"

ANTS' NESTING ACTIVITY AS A FACTOR OF SOILS PHYSICAL PROPERTIES CHANGES

Golichenkov M.V.¹, Maksimova I. A.¹, Zakalyukina Yu.V.¹, Dymova A.A.¹, Churilina A.E.², Kiryushin A.V.¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russia

Annotation: In the process of nesting activity, ants change the physical characteristics of the soil. For example, they are able to reduce the penetration resistance of the soil by 8 times compared with the control. The temperature regime of anthills is more aligned, and the particle size distribution, by contrast, is more variable compared to the control.

Введение

Муравьи – наиболее многочисленная группа насекомых Средней полосы России. Многие виды муравьев заселяют нижний ярус биоценозов, где формируют крупные гнезда, располагающиеся как на поверхности почвы, так и в почвенной толще. В связи с этим, с точки зрения почвоведения многие виды муравьев, формально не относящиеся к педобионтам, следует рассматривать в качестве почвообитающих животных. Действительно, по некоторым оценкам муравьи, например, *Lasius niger* и *L. flavus* в процессе гнездостроения могут переработать от 26 м³ до 50 м³ почвы на 1 га, а суммарный объем гнезд муравьев на небольшом участке луга может достигать 270 м³ (Зрянин, 1998, 2003). Характер воздействия муравьев на почву многообразен: это и педотурбация (Nkem, 2000; Rasse, Deneubourg, 2001), и обогащение почвы элементами питания, и своеобразный характер распределения их в муравьином гнезде с глубиной, иная морфология почвенного профиля внутри муравьиного гнезда, и ряд других показателей (Frouz, Jilkova, 2008; Kilpelainen, 2008). При этом, например, динамика некоторых микробиологических процессов, происходящих в муравьином гнезде, отличается от динамики этих же процессов, измеренных в контрольной, не заселенной муравьями почве, и, по всей видимости, связана с активностью муравьев в течение вегетационного периода (Голиченков и др., 2009).

В настоящей работе представлены результаты определения некоторых физических показателей почв муравейников. Целью исследования было показать различия в температурном режиме муравьиных гнезд, определить величины сопротивления пенетрации муравейников и контрольных почв, изучить гранулометрический состав муравьиных гнезд по сравнению с контрольными почвами.

Объекты и методы

В работе исследовали гнезда муравьев *Lasius niger*, *L. flavus* и *Formica cunicularia*. В гнездах, расположенных на залежном поле на высоком берегу р. Унжа в Рязанской области определяли измерение твердости с помощью ручного пенетрометра EJKELKAMP. На этом же полигоне изучали температурный режим муравейников при помощи логгеров



производства Dallas industries. Для этого, в начале вегетационного периода, в мае, в муравейник на уровне поверхности почвы помещали логгер, в качестве контроля рядом с муравейником насыпали земляной холмик по объему аналогичный муравейнику, под который так же помещали логгер. Логгеры записывали данные каждые 2 часа, а в конце вегетационного периода (вторая половина сентября) логгеры были извлечены для считывания записанной информации. Контрольная почва - постагродерново-подзол глееватый супесчаный на аллювиально-деллювиальных отложениях по классификации почв 1977 г. (Диагностика и классификация почв СССР, 1977) или освоенная супесчаная дерново-подзолистая почва (Диагностика и классификация почв, 2004).

Определение гранулометрического состава проводили в образцах муравьиных гнезд тех же видов муравьев, но отобранных на разных элементах рельефа долины реки Верюга в Устьянском районе Архангельской области. Определение гранулометрического состава проводили и в образцах органогенного горизонта контрольной почвы - освоенной дерново-мелкоподзолистой, легкосуглинистой на морене. Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции на приборе Analysette 22 comfort (Fritsch, Германия). Диспергация образцов проводилась с помощью ультразвуковой обработки на приборе Digital Sonifir 250 (Branson Ultrasonics, США) при заданной мощности (40% W). Для анализа почву растирали в ступке пестиком с резиновым наконечником, затем просеивали через сито 1 мм, масса навески составляла 300-400 мг.

Результаты

На рисунке 1 представлены усредненные результаты измерения твердости контрольной почвы в сравнении с муравейниками муравьев видов *L. niger* и *L. flavus*.

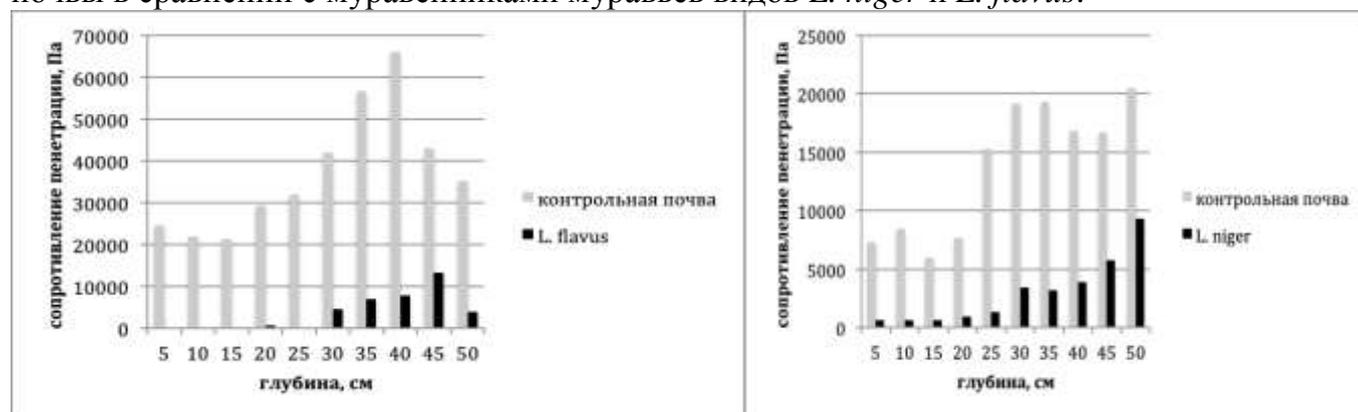


Рис. 1. Сопротивление пенетрации контрольной почвы и муравьиных гнезд *L. flavus* (справа)

Из полученных результатов следует, во-первых, что сопротивление пенетрации самой почвы на выбранных участках достаточно вариабельно, в среднем равно 37233 Па в окрестностях гнезд *L. flavus* и 13733 Па в контрольной почве *L. niger*, т.е. твердость почвы в окрестностях гнезд *L. flavus*, приблизительно, в 2 раза выше. При этом средняя твердость почвы муравьиного гнезда *L. flavus* в слое мощностью 50 см составляет 3746 Па против 9333 Па в гнездах *L. niger*. Таким образом, очевидно, что муравьи *L. flavus* в процессе гнездостроения сильнее снижают твердость почвы. Особенно хорошо это заметно на глубине 40 см, видимо, в области подплужной подошвы, где сила сопротивления пенетрации интактной почвы максимальна (66000 Па), в то время как в гнездах муравьев она составляет



в среднем 7867 Па, т.е. в 8 раз ниже. Это связано, вероятно, с экологией муравьев этого вида. Известно, что среди муравьев рода *Lasius*, именно вид *L. flavus* считается истинно педобионтным; эти муравьи способны жить в почве постоянно, показываясь на поверхности только в период размножения.

и *L. niger* (слева)

В дальнейшем, на этих же участках определяли температурный режим в гнездах муравьев *L. flavus* и *F. cunicularia*. На рисунке 2 представлены результаты, полученные в течение первой недели измерений.

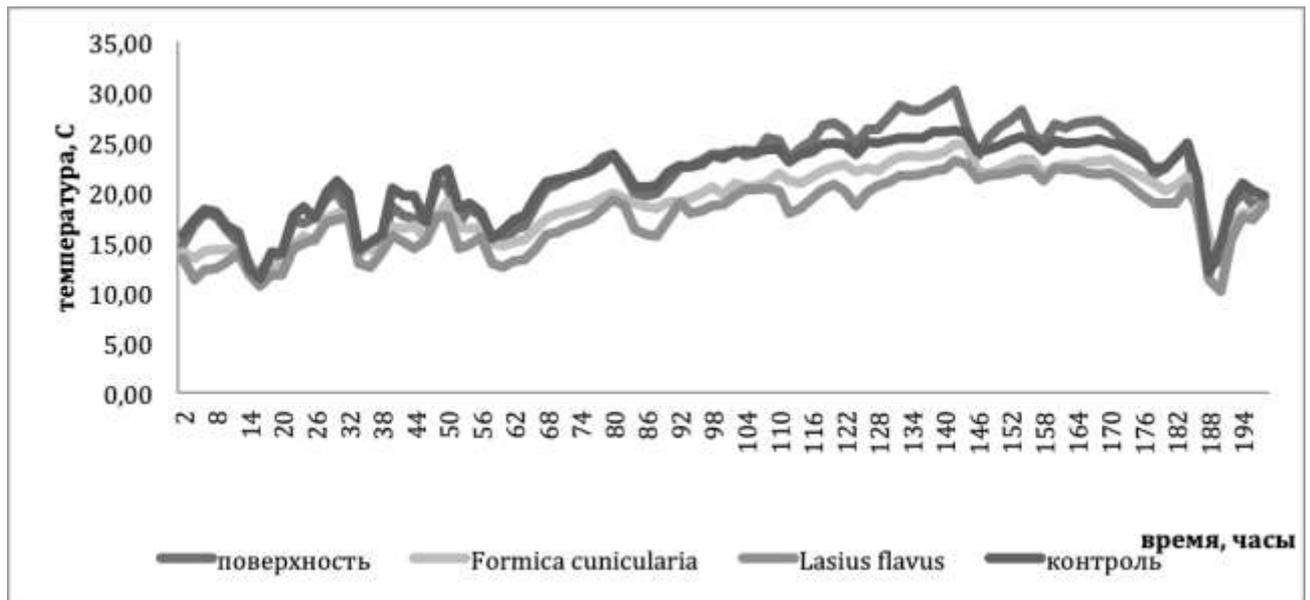


Рис. 2. Температурный режим гнезд *Formica cunicularia* и *Lasius flavus*

Из полученных данных следует, что средняя температура на поверхности почвы составляла 21,5 C⁰ (min 11,9 C⁰ max 30,1 C⁰ Δ =18,4 C⁰), в контроле – почвенном холмике, в основание которого был помещен логгер 21,4 C⁰ (min 11,4 C⁰ max 26,2 C⁰ Δ =14,8 C⁰), в основании холмика гнезда *F. cunicularia* 19,6 C⁰ (min 11,3 C⁰ max 24,8 C⁰ Δ =13,5 C⁰), в основании холмика гнезда *L. flavus* 17,7 C⁰ (min 10,2 C⁰ max 23,2 C⁰ Δ =13,7 C⁰). Таким образом, наименьший температурный коридор обнаруживается в гнездах муравьев, что может свидетельствовать о способности к термостатированию муравейников. В принципе, способность муравьев к поддержанию определенной температуры в гнезде известна и достигается за счет регулирования режима влажности или путем изменения режима проветривания гнезда, для чего муравьи способны, например, открывать дополнительные «вентиляционные отверстия» (Длусский, 1967).

В отдельном исследовании изучали гранулометрический состав муравьиных гнезд *L. niger* на разных элементах рельефа долины реки Верюга в Устьянском районе Архангельской области. Гранулометрический состав изучали в образцах холмиков муравейников и образцах органогенных горизонтов контрольных почв.

Образцы муравьиных гнезд, отобранные на пойме, были определены как легкосуглинистые и отличались от контрольных почв, в первую очередь, низким содержанием мелкопесчаной фракции (50-250 мкм) – около 1% - столь низкое содержание



этой фракции не было зафиксировано в других образцах. Образцы контрольной почвы, отобранные на террасе, были легкосуглинистыми, в то время как образцы муравейников – среднесуглинистыми, при этом, так же как и в образцах муравьиных гнезд на пойме, в них было отмечено пониженное содержание фракции мелкого песка, около 18% по сравнению с 28% в контрольной почве. Содержание всех остальных фракций в образце муравейников было несколько выше, чем в контрольной почве. На водоразделе гранулометрический состав контрольной почвы и муравьиных гнезд практически не различался.

На рисунке 3 представлены обобщенные данные гранулометрического анализа всех образцов, без учета рельефа. Из них можно заключить, что гранулометрический состав муравьиных гнезд более вариабелен и что, по всей видимости, в процессе гнездостроения муравьи не проявляют предпочтения к частицам определенного размера. Вероятно, они могут использовать более тонкие фракции в качестве цемента. Если допустить, что у муравьев существуют какие-либо предпочтения к величине почвенных частиц, из которых состоит гнездо и его структурные элементы, то эти различия следует искать на уровне микроагрегатов.

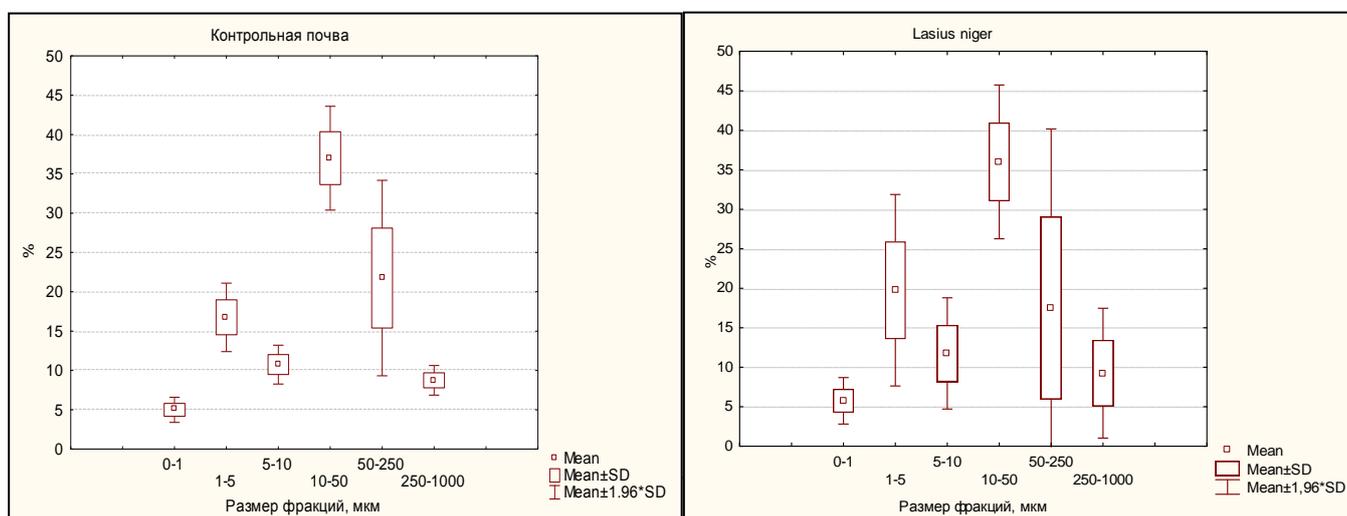


Рис. 3. Статистики гранулометрического анализа

Заключение

Представленные данные наглядно свидетельствуют о том, что в процессе гнездостроения муравьи существенно преобразуют физические показатели почв. Наиболее отчетливо, на наш взгляд, это проявляется в изменении твердости почв. Различия превышают разницу свойств почв зонального ряда и носят интразональный характер, способствуя формированию мозаичности почвенного покрова. Таким образом, на уровне микрорельефа почвенный покров насыщен многочисленными почвенными индивидуумами (в данном случае, гнездами муравьев), затрагивающими органогенные и минеральные горизонты вмещающей почвы и характеризующиеся специфическими физическими, химическими и биологическими свойствами. Формирование и существование этих индивидуумов всецело контролируется и связано с жизнедеятельностью колонии муравьев.

Литература

Голиченков М.В., Нейматов А.Л., Кирюшин А.В. (2009) Микробиологическая активность почв, заселенных муравьями *L. niger*. *Почвоведение*. 7, 847-852.



- Зрянин В. А. (2003) Влияние муравьев рода *Lasius* на почвы луговых биогеоценозов. *Зоологический журнал*. Т. 123, № 3, 278-288.
- Зрянин В. А. (1998) Особенности луговых мирмекокомплексов на почвах с разным механическим составом. *Зоологический журнал*. Т. 77, № 7, 800-808.
- Диагностика и классификация почв СССР. М.: «Колос», 1977. 264 с.
- Диагностика и классификация почв. М.: «Ойкумена», 2004. 27 с.
- Длусский Г.М. (1967) Муравьи рода формика. Москва. Наука.
- Frouz J., Jilkova V. (2008) The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrmecological News*. **11**, 191-199.
- Kilpeläinen J. (2008) Wood ants (*Formica rufa* group) in managed boreal forests: implications for soil properties and tree growth. *Dissertationes Forestales*. 66, 33.
- Nkem J.N. (2000) The impact of ant bioturbation and foraging activities on surrounding soils. *Pedobiologia*. **44**, 609-621;
- Rasse Ph., Deneubourg J.L. (2001) Dynamics of nest excavation and nest size regulation of *Lasius niger*. *Journal of Insect Behavior*. Vol.14, № 4, 433-449.



УДК 631.4

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНЫХ АГРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гончаров В.М.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
vmgoncharov@mail.ru

Annotation: The paper proposes the principles of integrated agrophysical research, spatial characteristics and soil assessment in the soil cover of the agricultural landscape. The theoretical foundations and experimental results of studies of the soil cover of the Vladimir Opolye are presented, showing that the change in agrophysical properties in the soil cover occurs gradually, continuously and regularly and is determined by both pedogenetic and agrotechnical factors.

Key words: agrolandscape, agrophysical properties, spatial characteristics, soil cover, compaction.

Введение

Современное почвоведение и адаптивно-ландшафтное земледелие уделяют большое внимание закономерностям распространения почв и их свойств на различных масштабных уровнях. При этом предполагается, что агрофизические свойства почв изменяются в пространстве в соответствии с распространением почв в почвенном покрове. Однако, физические свойства, а, следовательно, и важнейшие режимы, такие как водный, тепловой и воздушный, зависят не только от распространения почв, но определяются также и антропогенными факторами, изменяясь под внешним воздействием, прежде всего агротехнологическим. Необходима количественная информация о пространственно-распределенных физических свойствах почв в почвенном покрове, ландшафтная оценка и анализ агрофизических условий.

Фундаментальным физическим свойствам почвы и их классификациям посвящены работы многих отечественных и зарубежных исследователей (Качинский, 1965; Воронин, 1986; Бондарев, Медведев, 1980 и др.). При этом разработке принципов пространственной оценки, анализу закономерностей их распространения в пространстве, особенностям их соответствия со структурой почвенного покрова уделено недостаточно внимания.

Объект и методы

В данной работе показаны принципы пространственных агрофизических исследований на примере почв Владимирского ополья. Неоднородность почвенного покрова, а также длительное сельскохозяйственное использование территории являются основными причинами значительного варьирования физических свойств почв. Для латеральных исследований педогенетических особенностей и пространственного распространения физических свойств и возможных процессов в почвенном покрове предлагаются методы равномерного сеточного опробования и длинномерных трансект (до 50 м). Эти исследования требуют проведения массовых определений свойств, и, следовательно, необходим комплекс упрощенных полевых экспресс-методов, характеризующих условия для роста и развития растений. В наших исследованиях это были: плотность – буром Польского, твердость (или сопротивление пенетрации) – твердомером Качинского (или пенетрометром), водопроницаемость – методом трубок, влажность НВ – после прекращения гравитационного стока при определении водопроницаемости почвы методом трубок (влажность, близкая к НВ,



в дальнейшем обозначается НВ*). Не являясь полным аналогом классически определяемой НВ, но отражая, прежде всего, капиллярную водоудерживающую способность почвы, она позволяет сделать сравнительную оценку исследуемой площади в единых характеристиках.

Помимо традиционных показателей физического состояния нами применялись и некоторые расчетные, например, отношение логарифма водопроницаемости к порозности почвы, отражающий способность почвы проводить потоки влаги: чем он выше, тем интенсивнее потоки влаги на этом участке почвы. Это позволило назвать его «коэффициентом потенциальной проводимости».

Предлагаемый комплекс методов позволил провести латеральные исследования и получить пространственно-распределенную количественную агрофизическую информацию о почвенном покрове Владимирского ополья, необходимую для понимания условий формирования и функционирования агроландшафта.

Результаты и обсуждение

Результаты свидетельствуют о варьировании физических свойств в весьма широких диапазонах даже в пределах небольшого по площади (менее 3 га) сельскохозяйственного поля (рис.1).

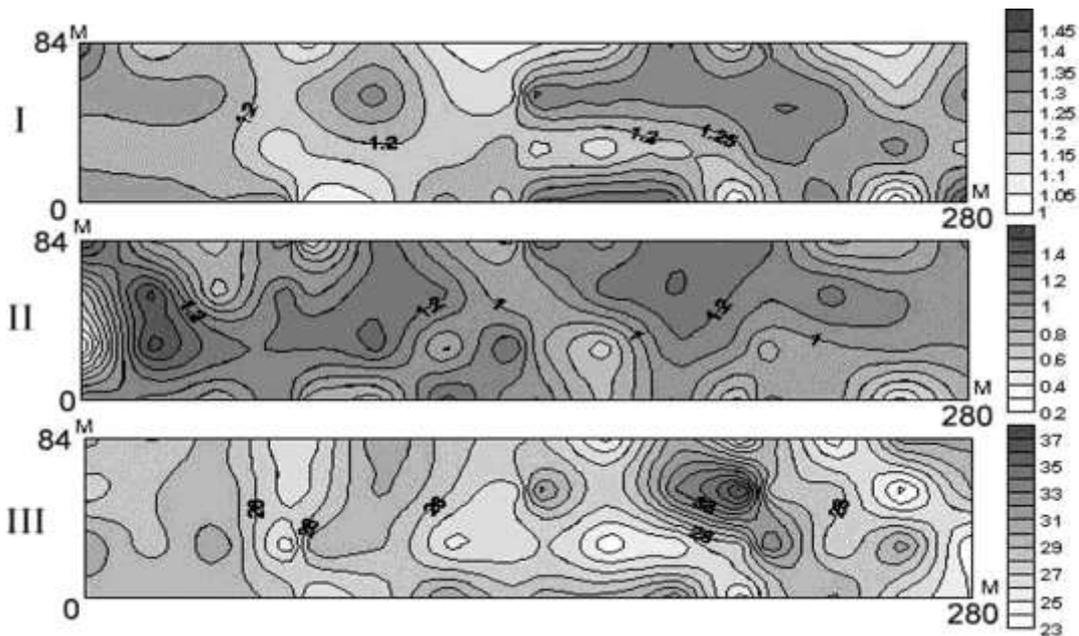


Рис. 1. Топоизоплеты (I) плотности, $г/см^3$, (II) сопротивления пенетрации, МПа, (III) влажности почвы, %, в слое 10-15 см серых лесных почв Владимирского ополья, май 2001 г.

При общей благоприятной картине агрофизического состояния в отдельных частях исследованного поля опытного участка отмечено переуплотнение (до $1,57 г/см^3$), особенно ярко проявляющееся в слое 20-25 см. Вместе с тем, достоверно выделяются рыхлые ($<1 г/см^3$) и, следовательно, обладающие высокой влагоемкостью зоны, приуроченные к почвам со 2-м гумусовым горизонтом (рис.2). Причиной этого, вероятно, является хорошая оструктуренность, благодаря повышенному содержанию гумуса, - до 6%. Отличия сохранились даже в пахотном слое, подверженном длительному перемешиванию и интенсивному антропогенному воздействию.

В меньшей степени подверженные уплотнению подпахотного слоя, серые лесные почвы со вторым гумусовым горизонтом являются характерными естественными дренами в



почвенном покрове. Высокая пористость, хорошо развитая структура порового пространства, в том числе крупных влагопроводящих, обеспечивают, с одной стороны, высокую водоудерживающую способность, и, с другой, быстрое передвижение влаги в этой части профиля. Их положение способствует формированию контрастной латеральной структуры агрофизических условий в ландшафте Владимирского ополя.

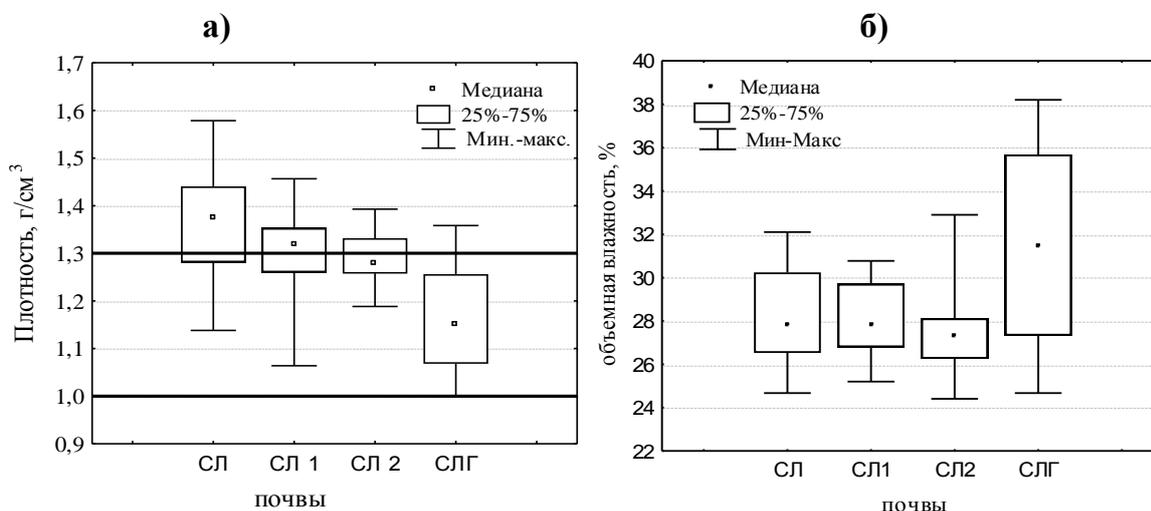


Рис. 2. Статистики варьирования: **а)** плотности (г/см^3), **б)** объемной влажности (%) в слое 30-35 см (май 2001 г.). Условные обозначения почв: **1** – серая лесная (СЛ); **2** – СЛ слабоподзоленная (СЛ1); **3** – СЛ среднеподзоленная (СЛ2); **4** – СЛ средне- или сильноподзоленная со вторым гумусовым горизонтом (СЛГ); **5** – серая лесная остаточно-карбонатная (СЛса).

Для детального исследования педогенетических особенностей и пространственного распространения физических свойств и возможных процессов в почвенном покрове был применен метод длинномерных трансект (до 50 м), вдоль которых одновременно с изучением морфологии почвенных горизонтов проводилось подробное с шагом 20-40 см комплексное опробование физических свойств.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты трансектных исследований, где, прежде всего, следует отметить положение почв со вторым гумусовым горизонтом (Ah). Он выделяется не только визуально по морфологическим признакам, но и совершенно определенно по физическим свойствам: повышенная влагопроводность, низкая плотность.

К этой части трансекты приурочен повышенный коэффициент потенциальной проводимости - отношение логарифма водопроницаемости к общей пористости (рис.4-2), имеющий ярко выраженное направление в глубину почвенного профиля. Такое распределение подтверждает явную тенденцию к вертикальному передвижению влаги, происходящему именно в этой зоне. По всей остальной протяженности профиля на глубине 20-25 см заметно формирование уплотненной “плужной подошвы”, которая имеет низкую проводимость и является определенным “экраном”, препятствующим стоку влаги в нижележащие слои.

Следовательно, сложность, комплексность почвенного покрова определяет “мозаичность” распределения физических свойств, ответственных за перенос веществ в агроландшафте. Влияние длительной сельскохозяйственной обработки и формирование уплотненного подпахотного слоя приводит к горизонтальной слоистости свойств из исходно вертикальной организации почвенного профиля.



Такая слоистость в распределении почвенно-физических свойств не является непрерывной, а определяется генетическим происхождением слагающих почвенного покрова. Так, в случае появления почв с Ah этот уплотненный слой уменьшается или исчезает совсем. Здесь возможно проявление вертикальных потоков влаги (Шейн и др., 2007), и эти места могут играть роль естественных дрена при формировании водного режима агроландшафта.

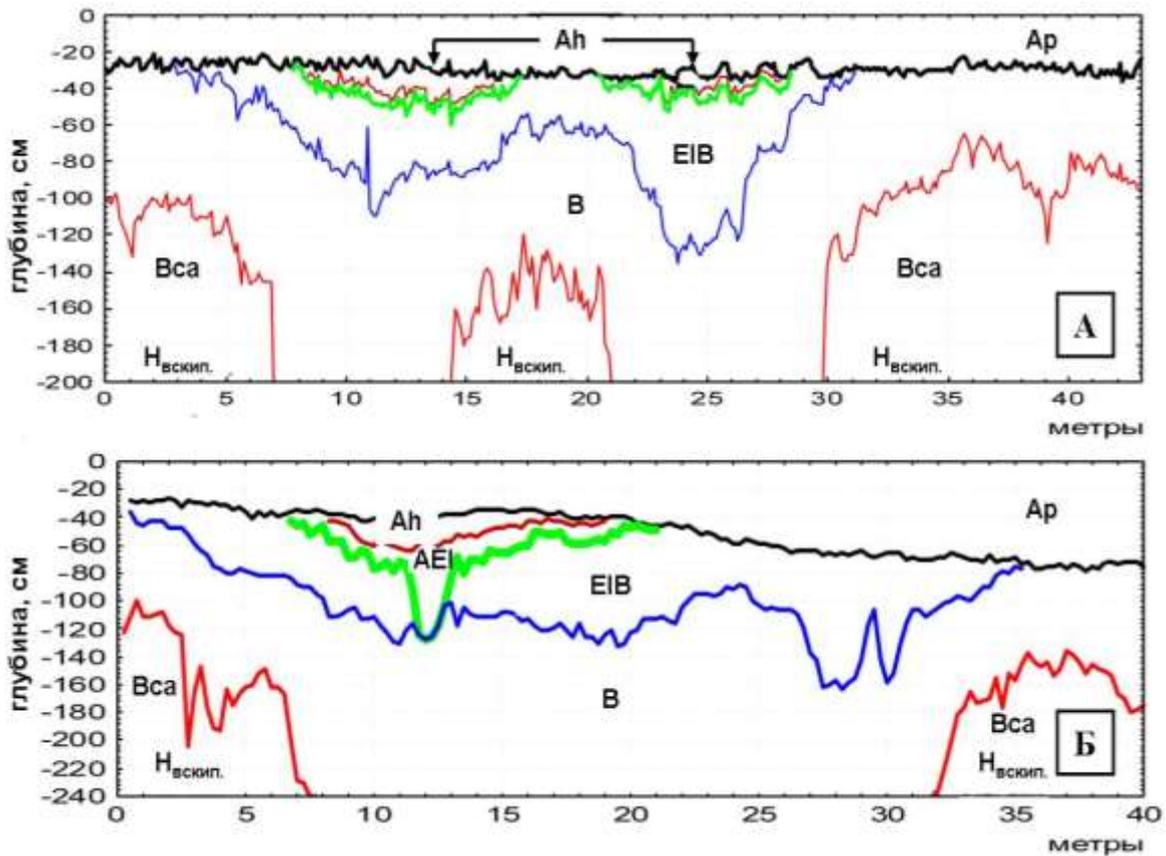


Рис. 3. Морфологическое строение профилей при трансектных исследованиях комплекса серых лесных почв Владимирского ополя.

Обозначения горизонтов: Ap – пахотный, Ah – гумусовый, AEI – гумусово-элювиальный, EIB – переходный, B – иллювиальный, Vca – карбонатный. $H_{\text{вскип}}$ – глубина вскипания.

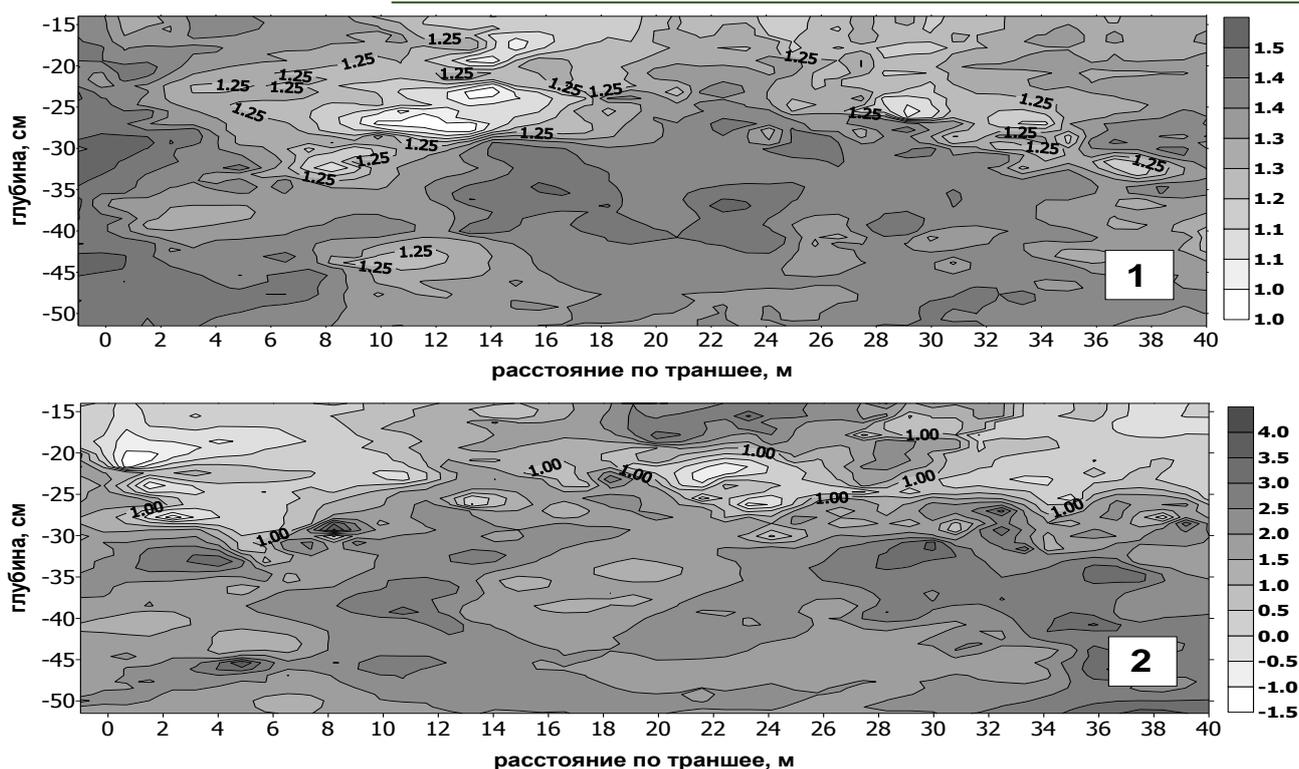


Рис. 4. Топоизоплеты (1) плотности почвы (г/см^3) и (2) отношения логарифма водопроницаемости (мм/мин) к общей пористости ($\text{см}^3/\text{см}^3$) в трансекте А.

Такое распределение физических свойств характеризует почвенный покров, как достаточно “мозаичное”, по функционированию, образование со сложной агрофизической картиной, обусловленной как педогенетическими (наличие второго гумусового горизонта, чередование горизонтов и др.), так и агротехнологическими причинами (особенности обработки, формирование «плужной подошвы» и др.).

В процессе сельскохозяйственного использования в пахотном горизонте происходит выравнивание почвенно-физических условий, снижение влияния исходных почвенно-генетических факторов на современное агрофизическое состояние. Однако в агрофизической практике именно верхний почвенный слой является наиболее диагностируемым, и, в основном, именно для него разработаны основные оценочные критерии и показатели. Следовательно, проведение количественной агрофизической оценки по почвенным контурам может привести к значительным ошибкам.

Агроландшафтная характеристика на основе результатов только почвенно-генетического обследования, особенно при высокой неоднородности почвенного покрова, становится затруднительной, ведь закономерности латерального распределения почв и агрофизических свойств могут различаться, и, подчеркнем вновь, агрофизическая оценка, базирующаяся на почвенных контурах, может привести к значительным ошибкам.

Для получения наглядной и количественной картины закономерностей пространственного распределения свойств внутри почвенных контуров целесообразно использовать ГИС-технологии, в которых графическая информация является основой интеграции пространственно-распределенных данных (Гончаров, 2010). Преимущества такого подхода очевидны, т.к. совмещение функциональных поверхностей позволяет интегрировать данные, расположенные в разных тематических слоях, анализируя, например, структуру почвенного покрова и латеральную изменчивость физических свойств почвы (рис.5).



Можно, к примеру, оценить суммарную подверженность каждой почвенной разности формированию «плужной подошвы» - зон с неблагоприятными показателями плотности ($>1,3$ г/см³) в слое 20-25 см, рассчитать их удельную площадь относительно площади определенного почвенного контура (полигона): $S_{уд} = (S_{кат} / S_{конт}) \times 100\%$.

Представленная диаграмма показывает, что категории повышенной плотности в подпахотном слое присутствуют у всех почвенных разностей, однако их вклад в формирование «плужной подошвы» на исследованном поле различен. Минимальные процентные соотношения значений, выходящих за оптимальный диапазон, отмечены у серых лесных почв со вторым гумусовым горизонтом, что согласуется с результатами, представленными ранее.

Следовательно, почвенная карта в её традиционном изображении должна служить основой для количественной характеристики почвенно-физического состояния территории. Однако только на основе генетических принципов выделения границ почвенных контуров невозможно создать карту агрофизических свойств почв. В почвенном покрове эти свойства распределены непрерывно и определяются, помимо генетических факторов, еще и факторами агротехнического влияния. Это отмечал в своих работах и Е.А.Дмитриев (2001).

Отмеченные закономерности в пространственной агрофизической организации почвенного покрова играют особую роль в процессах перераспределения влаги, почвенного воздуха, температуры в профиле исследуемых почв и, соответственно, в обеспечении оптимальных условий для роста и развития растений. По-видимому, основополагающими моментами при разработке технологий должны стать комплексные агрофизические исследования, а не только почвенно-морфологическое выделение границ.

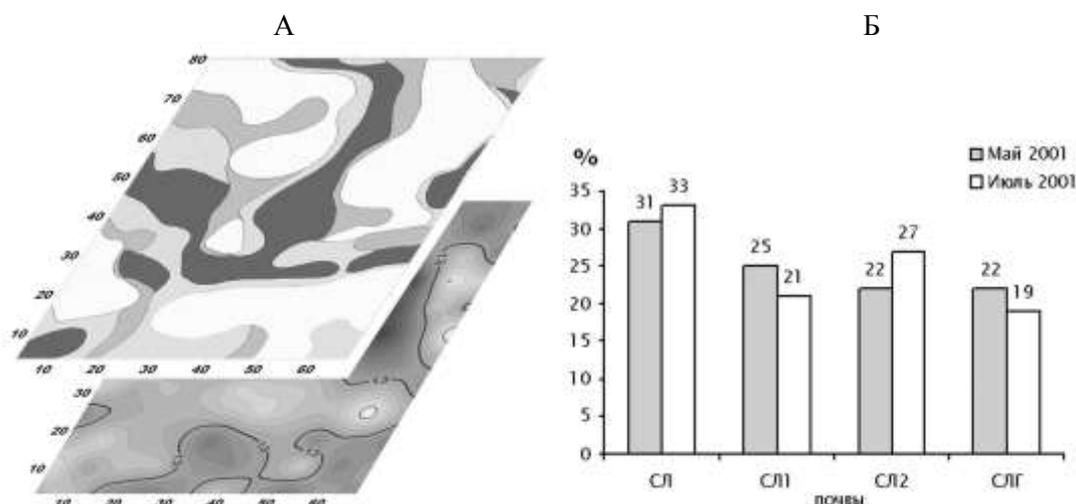


Рис. 5. Схема наложения тематических слоев - почвенной карты опытного участка Владимирского ополья и топоизоплет плотности почвы в слое 20-25 см (А) и диаграмма площадного распределения повышенной плотности ($>1,3$ г/см³) среди почвенных разностей (%) (Б).

Выводы

Результаты комплексных агрофизических исследований почвенного покрова Владимирского ополья позволили сделать следующие выводы:

1. Исследования физических свойств в длинномерных траншеях и по пространственно-распределенной сетке почвенных разрезов показали, что изменение агрофизических свойств в почвенном покрове происходит постепенно, непрерывно и закономерно и определяется как педогенетическими, так и агротехническими факторами.



2. На примере комплекса серых лесных почв Владимирского ополья предложена методика последовательного педометрического анализа агрофизических свойств в условиях высокой неоднородности, заключающаяся в получении экспериментального материала по сетке опробования, построении топоизоплет свойств методами пространственной интерполяции, выделении площадей различных категорий свойств, их сопряженном анализе и оценке с помощью ГИС-технологий.
3. Физические свойства комплекса серых лесных почв Владимирского ополья характеризуются высокой агрофизической вариабельностью, а пространственное положение зон с различными условиями не соответствует в точности границам почвенных контуров.
4. В пахотном горизонте закономерности пространственного распределения физических свойств связаны с формированием уплотненных зон, а в более глубоких, подпахотных слоях – с неоднородной структурой почвенного покрова Ополья.

Литература

1. Бондарев А.Г., Медведев В.В. Некоторые пути определения оптимальных параметров агрофизических свойств почв // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 1980, с.85-98.
2. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: 1986, 244 С.
3. Гончаров В.М. Применение ГИС-технологий при агрофизической оценке территории// Вестник Оренбургского госуниверситета, 2010., №6, с. 100-105.
4. Дмитриев Е.А. К проблеме неоднородности почв почвенного покрова // В кн.: Теоретические и методологические проблемы почвоведения. М.: ГЕОС, 2001, с. 100–116.
5. Шеин Е.В., Умарова А.К.Б., Кирдяшкин П.И., Самойлов О.А. Преимущественные потоки влаги в структурных суглинистых почвах // Proc. Int. Conf. «Soil Science – Base for sustainable Agriculture and Environment Protection». 2007, Sofia, Bulgaria. ПъблишСайСет-Еко», Part 1, pp. 113-115.



УДК 631.46: 579.8.04

РАЗНООБРАЗИЕ ПРОКАРИОТНЫХ СООБЩЕСТВ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ БОЛОТНО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ (МЕТОД ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ ГЕНА 16S РРНК)

Конова И. А.¹, Готовцев П. М.¹, Лысак Л. В.²

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация, pomidoriy.vrachis@gmail.com

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация, lvlysak@mail.ru

DIVERSITY OF PROKARIOTIC COMMUNITIES INHABITING FERROMANGANESE CONCRETIONS
FROM BOG-PODZOLIC SOIL (NGS OF 16S RRNA GENE)

Konova I. A.¹, Gotovtsev P. M.¹, Lysak L. V.²

¹NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russian Federation, pomidoriy.vrachis@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russian Federation, lvlysak@mail.ru

Annotation: Taxonomic diversity of the prokaryotic community of ferromanganese concretions of bog-podzolic soil has been studied using the high-throughput sequencing of the 16S rRNA gene. It was shown that it was formed mainly by 7 bacterial phyla (Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Verrucomicrobia, Chloroflexi, Planctomycetes and Firmicutes) and 2 Archaea phyla (Thaumarchaeota and Crenarchaeota). Prokaryotes capable of transforming iron and manganese under aerobic and anaerobic conditions (Crenarchaeota, Acidimicrobiales, Nuphromicrobiaceae, Rhodospirillaceae, Ktedonobacteria, Sinobacteraceae, Chloroflexi, Proteobacteria of genus *Pseudomonas*) were found in the studied samples.

Введение

Почва является полифазной средой обитания, населенной миллиардами бактериальных клеток. Классические микробиологические методы оценки таксономического разнообразия прокариот в почве не дают полной картины, так как не позволяют обнаружить жизнеспособные, но некультивируемые формы. Активное развитие молекулярно-биологических методов, таких, как метод флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH) и метагеномный анализ позволили значительно расширить наши представления о таксономическом разнообразии прокариот. Неоднородность почвы и вариативность физико-химических условий в различных почвенных локусах приводит к значительным различиям таксономической структуры микробных сообществ в пределах одного почвенного горизонта (Основные достижения и перспективы почвенной метагеномики, 2017). Специфической микробиологической нишей являются почвенные новообразования (конкреции и секрети). Одним из малоизученных и дискуссионных вопросов почвенной микробиологии является таксономический состав железомарганцевых конкреций.

Ранее с помощью метода FISH в образцах железомарганцевых конкреций из дерново-луговой и дерново-подзолистой почв были обнаружены представители филумов Proteobacteria, Acidobacteria и Planctomycetes (Лысак и др., 2013), причем протеобактерии значительно преобладали над остальными группами прокариот. Анализ метагенома элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы, богатого конкрециями, также выявил доминирование филума протеобактерий (Чернов, 2016).

Целью нашей работы было изучение таксономического разнообразия железомарганцевых конкреций из элювиального горизонта болотно-подзолистой почвы при помощи метода высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК.



Объекты и методы

Объектом исследования были образцы железомарганцевых конкреций из горизонта ЕВ (33–44 см) болотно-подзолистой почвы, отобранные на территории УОПЭЦ «Чашниково». Выделение ДНК из образцов конкреций, секвенирование фрагментов рибосомальных оперонов и обработка результатов проводились с использованием оборудования ЦКП «Геномные технологии, протеомика и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ. Для выделения ДНК из образцов был использован набор реактивов (MACHEREY-NAGEL NucleoSpin Soil) компании MACHEREY-NAGEL (Германия) согласно инструкции производителя. Амплификацию гена 16S рНК проводили с универсальными праймерами F515/R806 на переменный участок гена 16SpНКv3-v4 (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA/GGACTACVSGGGTATCTAAT), специфичными для широкого круга микроорганизмов, включая бактерии и археи. Подготовку библиотек проводили в соответствии с инструкцией производителя MiSeq Reagent Kit Preparation Guide (Illumina). Библиотеки ампликонов секвенировали в соответствии с инструкцией изготовителя на приборе Illumina MiSeq (Illumina, США) с использованием набора реактивов MiSeq® ReagentKit v3 (600 cycle) с двусторонним чтением (2*300 н). Данные, полученные в результате секвенирования образцов, обрабатывались с использованием пакетов ПО «Trimmomatic» и «QIIME».

Проведен анализ 4 образцов железомарганцевых конкреций. Для анализа полученных данных использовали средние значения обилия таксонов.

Результаты и обсуждение

Известно, что почвенное бактериальное сообщество сформировано преимущественно 9 филумами: Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Verrucomicrobia, Bacteroidetes, Chloroflexi, Planctomycetes, Gemmatimonadetes и Firmicutes (Чернов, 2016). В образцах железомарганцевых конкреций из горизонта ЕВ болотно-подзолистой почвы в значимых количествах представлены 7 из 9 основных филумов.

Анализ метагенома образцов железомарганцевых конкреций из горизонта ЕВ болотно-подзолистой почвы показал преобладание следующих филумов бактерий: Actinobacteria (23,54%), Proteobacteria (21,72%), и Chloroflexi (20,57%). Меньшую долю от общего числа прокариот составили филумы Firmicutes (9,18%), Acidobacteria (5,21%), Nitrospirae (2,08%) и Verrucomicrobia (1,48%). Содержание филумов Armatimonadetes, Planctomycetes, Gemmatimonadetes и филума-кандидата AD3 не превышало 1%. Относительное обилие других филумов составляло десятые и сотые доли процента (Bacteroidetes, Chloroflexi, Cyanobacteria, Elusimicrobia, Tenericutes и филум-кандидат WPS-2). Доля неидентифицированных таксонов составляла 2%.

В филуме Actinobacteria доминировал порядок Actinomycetales, причем преобладали представители родов *Arthrobacter*, *Nocardia*, *Promicromonospora*, *Intrasporangium*, *Streptomyces*, известные как типичные педобионты. Доля актинобактерий в конкрециях близка к их содержанию в элювиальном горизонте дерново-подзолистой почвы (Чернов, 2016). Обращает на себя внимание присутствие среди актинобактерий порядка Acidimicrobiales, представители которого ранее были обнаружены в морских осадках с высоким содержанием железа (Chen et al., 2016).

Среди протеобактерий преобладали Alphaproteobacteria — их доля от общего числа прокариотов составила 9,33%. В составе этой группы бактерий обнаружены семейства



Нурhomicobiaceae и Rhodospirillaceae, представители которых способны к окислению железа и марганца в аэробных условиях (Пиневич, 2005). Следующим по обилию классом протеобактерий были Betaproteobacteria (4,35%), представленные порядком Burkholderiales, семействами Comamonadaceae, Oxalobacteraceae и Burkholderiaceae, в состав которых входят бактерии, ассоциированные с растениями (Lemanceau et al., 2017). Deltaproteobacteria составили 3,5% общего числа прокариот, в основном представители порядка Мухососcales, широко распространенные в почвах, и Syntrophobacterales — сульфатредуцирующие анаэробные бактерии, способные к росту на ацетате и пропионате. Сравнительно малочисленной группой в составе филума Proteobacteria оказалась Gammaproteobacteria (0,98%), порядки Xanthomonadales (семейство Sinobacteraceae) и Pseudomonadales. Известно, что, некоторые виды рода *Pseudomonas* способны к окислению железа в аэробных условиях и восстановлению марганца в анаэробных условиях (Пиневич, 2005). Представители семейства Sinobacteraceae в значительных количествах обнаруживались в образцах железомарганцевых конкреций со дна океана (Tully, Heidelberg, 2013). Обращает на себя внимание довольно высокое содержание филума Chloroflexi. В составе этого филума присутствуют анаэробные бактерии, способные окислять железо и марганец в почвах в анаэробных условиях (Пиневич, 2005). Согласно литературным данным, филумом Chloroflexi представлена значительная часть прокариотного населения внутренней поверхности почвенных агрегатов (микроаэрофильные зоны) (Основные достижения ... 2017). В составе филума Chloroflexi доминировало семейство Thermogemmatimonadaceae класса Ktedonobacteria. Это семейство представлено бактериями, способными к трансформации марганца в анаэробных условиях.

В составе филума Firmicutes обнаружены порядки Bacillales и Clostridiales, являющиеся типичными педобионтами, некоторые виды рода *Bacillus* способны к окислению железа в аэробных условиях известны как (Пиневич, 2005).

Филум Acidobacteria был представлен группами Koribacteraceae, Ellin6513 и Solibacteraceae. Эти группы описаны в литературе как олиготрофные микроорганизмы (Pershina et al., 2015). Следует отметить, что соотношение филумов Proteobacteria и Acidobacteria в исследованных нами образцах конкреций из болотно-подзолистых почв, совпадает с их соотношением, определенным нами ранее методом FISH (Лысак и др., 2013). Известно, что представители филумов Acidobacteria и Nitrospirae обитают в почвенных локусах, бедных доступным углеродом и фосфором. Этим можно объяснить присутствие Nitrospirae в наших образцах. Ранее этот филум в значимых количествах был зарегистрирован в образцах горизонта BEL дерново-подзолистой почвы (Чернов, 2016).

Филум Verrucomicrobia был представлен семейством Chthoniobacteraceae, а именно филотипом DA101. Этот филотип обнаруживается практически во всех почвенных образцах. Относительное обилие DA101 велико в почвах, богатых органическим веществом (Brewer et al., 2016). В дерново-подзолистой почве этот филотип составляет относительно небольшой процент прокариотного сообщества (Чернов, 2016), и полученные нами результаты (1,48% Verrucomicrobia в образцах конкреций) соответствует литературным данным.

Археи в исследованных конкрециях были представлены филумами Thaumarchaeota (10,98%) и Crenarchaeota (менее 0,1%). Филум Thaumarchaeota способны к окислению аммония и широко распространены в почвах и других местообитаниях. Среди филума Crenarchaeota обнаружены организмы, участвующие в превращениях железа и марганца в аэробных и анаэробных условиях.



Выводы

Впервые при помощи метода высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК изучено разнообразие прокариотного сообщества железомарганцевых конкреций болотно-подзолистой почвы. Показано, что оно сформировано преимущественно 7 филумами бактерий (Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria, Verrucomicrobia, Chloroflexi, Planctomycetes и Firmicutes) и 2 филумами архей (Thaumarchaeota и Crenarchaeota). В образцах железомарганцевых конкреций из горизонта ЕВ болотно-подзолистой почвы обнаружены как типичные для почв группы организмов (Actinomycetales, Мухососcales, Hyphomicrobiaceae, Bacillales, Clostridiales, DA101, Thaumarchaeota), так и прокариоты, способные к трансформации железа и марганца в аэробных и анаэробных условиях (Crenarchaeota, Acidimicrobiales, Hyphomicrobiaceae, Rhodospirillaceae, Ktedonobacteria, Sinobacteraceae, Chloroflexi и некоторые другие).

Литература

- Лысак Л. В., Кадулин М. С., Конова И. А., Лапыгина Е. В., Иванов А. В., Звягинцев Д. Г. (2013). Численность, жизнеспособность и таксономический состав наночастиц бактерий в железомарганцевых конкрециях. // *Почвоведение*. № 6. С. 707–725.
- Основные достижения почвенной метагеномики (2017). Под ред. Е. В. Першиной, О. В. Кутовой, Б. М. Когута, Е. Е. Андропова. СПб.: Информ-Навигатор. 288 с.
- Пиневиц А. В. (2005). Микробиология железа и марганца. С.-Петербург. гос. ун-т. 387 с.
- Чернов Т. И. (2016). Метагеномный анализ прокариотных сообществ профилей почв европейской части России: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. биол. наук. Москва. 111 с.
- Brewer T. E., Handley K. M., Carini P., Gilibert J. A., Fierer N. (2016). Genome reduction in an abundant and ubiquitous soil bacterium ‘Candidatus Udaeobacter copiosus’ // *Nature Microbiology*. Vol. 2. Article number 16198.
- Chen P., Zhang L., Guo X., Dai X., Liu L., Xi L., Wang J., Song L., Wang Y., Zhu Y., Huang L., Huang Y. (2016). Diversity, Biogeography, and Biodegradation Potential of Actinobacteria in the Deep-Sea Sediments along the Southwest Indian Ridge // *Front. Microbiol.* Vol. 7. P. 1340-1350. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01340
- Lemanceau P., Barret M., Mazurier S., Mondy S., Pivato B., Fort T., Vacher C. (2016). Plant Communication With Associated Microbiota in the Spherosphere, Rhizosphere and Phyllosphere // *Advances in Botanical Research*. Vol. 82. P. 101–133. DOI: 10.1016/bs.abr.2016.10.007
- Pershina E., Valkonen J., Kurki, P., Ivanova E., Chirak E., Korvigo I., Provorov N., Andronov E. (2015). Comparative Analysis of Prokaryotic Communities Associated with Organic and Conventional Farming Systems. *PLoS ONE* 10(12): e0145072. DOI: 10.1371/journal.pone.0145072
- Tully B. J., Heidelberg J. F. (2013). Microbial communities associated with ferromanganese nodules and the surrounding sediments // *Front Microbiol.* Vol. 4. P. 161-171. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00161



УДК 631.51

ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОВ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ВЛАДИМИРСКОГО ОПОЛЯ

Корчагин А.А.^{1,2}, Зинченко М.К.², Мазиров М.А.³, Винокуров И.Ю.², Рагимов А.О.¹

¹ФГБОУ ВО Владимирский государственный институт им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация
korchaginaa60@mail.ru

²ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ», г. Суздаль, Российская Федерация
adm@vnish.elcom.ru

³РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация
mazirov@mail.ru

THE INFLUENCE OF PRIMARY PROCESSING METHODS ON BIOLOGICAL ACTIVITY OF GRAY FOREST SOILS OF VLADIMIR OPOLYE

Korchagin A.A.^{1,2}, Zinchenko M.K.², Mazirov M.A.³, Vnokurov I.Y.², Ragimov A.O.¹

¹Vladimir state University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

²Upper Volga federal Agricultural Scientific Center, Vladimir region, Suzdal, Russian Federation

³Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Annotation: In the field stationary experiment conducted on the gray forest soil of Vladimir Opole, the influence of annual fine tillage on 10-12 cm, annual deep tillage on 25-27 cm, annual dump plowing on 20-22 cm on the enzymatic activity of catalase and urease in the link of crop rotation: black steam-winter wheat.

Введение

Одним из важнейших показателей экологического состояния почвы является ее биологическая активность – основа жизнедеятельности почвы как живого организма. Микроорганизмы разлагают растительные остатки, участвуют в круговороте веществ в природе, и от их активности зависит содержание гумуса и питательных элементов в почве. Среди известных методов диагностики антропогенных изменений биологических свойств почв, наиболее перспективными считаются методы, основанные на определении ферментативной активности почвы: каталазы, уреазы и др. (Хазиев, 2005).

Биогенность почвы определяется множеством условий: температурным режимом, аэрацией, содержанием органического вещества, оптимальной влажностью и реакцией почвенной среды и т.д., которые можно в той или иной степени регулировать обработкой почвы.

Прямым следствием механической обработки является изменение аэрации, влажности и других условий жизнедеятельности почвенной микрофлоры, а косвенным – перераспределение по слоям почвы органического вещества – источника пищи и энергетического материала микробов (Лыков, 1982).

Объекты и методы

Цель исследований: установить влияние приемов основной обработки почвы на биологическую активность серой лесной почвы Владимирского ополя.

В качестве показателей биологической активности определяли:

- ферментативную активность каталазы;
- уреазную активность почвы.



Исследования проведены в 2012-2013 гг. Почва серая лесная среднесуглинистая на покровном лессовидном суглинке, пахотный слой характеризуется следующими агрохимическими свойствами: содержание гумуса 2,5 %, подвижного фосфора 150 мг/кг и обменного калия 138 мг/кг почвы, $pH_{\text{сол}}$ 5,8.

В 2012 году изучали биологические показатели под черным паром, а в 2013 году – под озимой пшеницей (табл. 1).

Таблица 1. Схема опыта

| Год | Культура | Приемы основной обработки | | |
|------|----------------|--|--|--|
| 2012 | Пар чёрный | Мелкая безотвальная обработка на глубину 10-12 см. | Глубокая безотвальная обработка на глубину 25-27 см. | Отвальная вспашка на глубину 20 - 22 см. |
| 2013 | Озимая пшеница | | | |

Экспериментальные исследования проводили в многолетнем стационарном полевом опыте, заложенном в 1996 году.

Изучались 3 варианта обработки почвы:

1. Ежегодная мелкая безотвальная обработка (ЕМБО) (КПС – 4 на 10-12см);
2. Ежегодная глубокая безотвальная обработка (ЕГБО) (КПГ- 250 на 25-27см);
3. Ежегодная отвальная вспашка (ЕОВ) (ПЛН-5-35 на 20-22см).

Под озимую пшеницу в черном пару внесли навоз 40 т/га и N60 в форме аммиачной селитры.

Для систематического микробиологического исследования были взяты образцы почв по слоям 0-10, 10-20, 20-30 см.

Применяли комплексные микробиологические и биохимические методы исследования: ферментативную активность каталазы газометрическим методом (Звягинцев, 1991), активность фермента уреазы определяли методом Аристовской, Чугуновой (Аристовская, Чугунова, 1989); определение влажности почвы термостатно - весовым методом (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Результаты и обсуждение

На динамику развития и состояния микробиологического комплекса существенное влияние оказывают абиотические факторы: температура воздуха и влажность почвы. По метеорологическим условиям вегетационные периоды 2012 и 2013 гг. были близкими. Температурный режим весенне-летнего периодов в целом соответствовал среднемноголетним показателям. Количество выпавших осадков за апрель-сентябрь превосходило среднемноголетнюю норму на 27,5 % и 28, 2 % соответственно. Запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы за период вегетации оценивалась как удовлетворительные: от 20 до 40 мм. водн. сл. (по классификации Медведева, 2002). Такие климатические условия вызвали активное развитие микрофлоры, участвующей в трансформации мортмассы органических остатков.

Не выявлено существенных различий между уровнем влажности почвы в зависимости от приёмов обработки почвы. Однако, отмечена тенденция увеличения влажности на безотвальных обработках (Корчагин и др., 2017).

Результатами исследований установлено, что максимальная ферментативная активность каталазы в слое 0-30 см под черным паром отмечается в мае от 1,9 до 3,0 мл $O_2/1г$ почвы в



минуту, к сентябрю активность каталазы снижается до 1,3-2,5 мл O_2 /1г почвы в минуту (табл. 2). На фонах с ежегодными безотвальными обработками активность окислительно-восстановительного фермента каталазы повышается в слое 0-10 см в среднем за сезон до значения 2,4-2,7 мл O_2 /1г почвы в минуту, в то время как по вспашке он соответствовал 1,7-2,0 мл O_2 /1г почвы в минуту. По-видимому, это связано с предыдущим обогащением и накоплением органических остатков в верхнем слое почвы при безотвальных обработках.

Таблица 2 Ферментативная активность каталазы в почве под черным паром, мл O_2 /г почвы в минуту

| Вариант | Глубина, см | Май | Июль | Сентябрь | Среднее за сезон |
|--------------------|-------------|------|------|----------|------------------|
| ЕМБО на 10 - 12см | 0 – 10 | 3,0 | 2,6 | 2,5 | 2,7 |
| | 10 – 20 | 2,4 | 2,5 | 2,1 | 2,3 |
| | 20 - 30 | 2,3 | 2,1 | 1,6 | 2,0 |
| ЕГБО на 25-27 см | 0 – 10 | 2,4 | 2,9 | 2,0 | 2,4 |
| | 10 – 20 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 2,1 |
| | 20 - 30 | 2,2 | 1,9 | 1,9 | 2,0 |
| ЕОВ на 20 – 22 см | 0 – 10 | 2,3 | 2,1 | 1,6 | 2,0 |
| | 10 – 20 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,9 |
| | 20 - 30 | 1,9 | 1,8 | 1,3 | 1,7 |
| НСР _{0,5} | 0 – 10 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | - |
| | 10 – 20 | 0,15 | 0,12 | 0,12 | - |
| | 20 - 30 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | - |

В процессе возделывания сельскохозяйственных культур в агроценозе возникают аллелопатические взаимодействия между растениями и микробным пулом почвы. Они определяются биологическими особенностями культуры, количеством и химическим составом не только пожнивно-корневых остатков, но и зависят от количества и химического состава корневых экссудатов во время вегетации культур. Количественный и качественный состав растительных калинов влияет на активность микробного комплекса почвы, в том числе и на продуцирование ферментов. Поэтому закономерно, что каталазная активность выше в почве агроценозов, занятых культурами севооборота. На вариантах, занятых озимой пшеницей, активность фермента в слое 0 – 30 см достоверно выше, чем на вариантах черного пара (табл. 3).

Таблица 3. Активность каталазы в серой лесной почве под озимой пшеницей, мл O_2 /г почвы в минуту

| Вариант | Глубина, см | Май | Июль | Сентябрь | Среднее за сезон |
|--------------------|-------------|-----|------|----------|------------------|
| ЕМБО на 10 - 12 см | 0 – 10 | 3,0 | 3,0 | 3,2 | 3,1 |
| | 10 – 20 | 2,5 | 2,9 | 3,0 | 2,8 |
| | 20 - 30 | 3,0 | 3,1 | 2,6 | 2,9 |
| ЕГБО на 25 - 27 см | 0 – 10 | 3,0 | 2,6 | 3,4 | 3,0 |
| | 10 – 20 | 2,7 | 2,9 | 3,2 | 2,9 |
| | 20 - 30 | 2,7 | 2,5 | 3,1 | 2,8 |
| ЕОВ на 20 – 22 см | 0 – 10 | 2,9 | 2,7 | 3,3 | 3,0 |
| | 10 – 20 | 3,0 | 2,6 | 3,3 | 3,0 |
| | 20 - 30 | 2,8 | 3,0 | 2,8 | 2,9 |



| | | | | | |
|--------------------|---------|------|------|------|---|
| НСР _{0,5} | 0 – 10 | 0,12 | 0,12 | 0,15 | - |
| | 10 – 20 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | - |
| | 20 - 30 | 0,12 | 0,16 | 0,18 | - |

Исследования по срокам отбора показали, что максимум активности каталазы приходится на сентябрь 2,6-3,4 мл O₂/1г почвы в минуту.

Ежегодная отвальная вспашка способствует формированию гомогенного пахотного слоя, и равномерному перераспределению органического материала, что и определяет низкую дифференциацию ферментативной активности по слоям почвы, которая в слоях 0-10 и 10-20 см в среднем за сезон составила 3,0 мл O₂/1г почвы в минуту.

Применение безотвальных обработок приводит к четкой дифференциации пахотного слоя по активности каталазы. Результатом многолетнего применения безотвальных обработок почвы является достоверное увеличение каталазной активности в слое 0-10 см до 3,0 -3,1 мл O₂/1г почвы в минуту в сравнении с более глубокими слоями почвы, которая составила 2,8-2,9 мл O₂/1г почвы в минуту.

Уреаза – фермент класса гидролаз, катализирует расщепление мочевины на диоксид углерода и аммиак. Эта реакция одна из важнейших в круговороте азота в природе.

В связи с широким применением в последние годы мочевины в качестве азотного удобрения вопросы, связанные с её превращением под действием уреазы, являются практически важными.

Различия в скорости деструкции мочевины по вариантам отмечены на паровом поле. Через 24 часа она была максимальной в варианте с мелкой безотвальной обработкой – рН 8. А через 48 часов величина рН воздушной среды над почвой с мелкой обработкой и вспашкой увеличилась до 10. Отставание в разложении мочевины наблюдалось на варианте с глубокой безотвальной обработкой - рН 9 (таблица 3).

Таблица 3. Скорость деструкции мочевины в почве агроценозов в зависимости от приемов основной обработки и культуры севооборота слое 0-10 см, рН

| Вариант | Время экспозиции | Черный пар | Озимая пшеница |
|--------------------|------------------|------------|----------------|
| ЕМБО на 10 - 12 см | 24 | 8,0 | 6,5 |
| | 48 | 10,0 | 9,0 |
| ЕГБО на 25 - 27 см | 24 | 7,0 | 6,5 |
| | 48 | 9,0 | 9,0 |
| ЕОВ на 20 – 22 см | 24 | 7,5 | 6,5 |
| | 48 | 10,0 | 9,0 |

Скорость ответной реакции на внесение мочевины в посевах озимой пшеницы была равнозначна на всех изучаемых приемах обработки - через 24 часа рН припочвенного воздуха составила 6,5 единицы, а через 41 час рН 9.

Выводы

1. Каталазная активность на вариантах занятых озимой пшеницей в слое 0-30 см достоверно выше, чем на вариантах черного пара.

2. Применение ежегодной отвальной вспашки, способствуя формированию гомогенного пахотного слоя, определила низкую дифференциацию ферментативной активности пахотного слоя почвы, которая составила 3,0 мл O₂/1г почвы в минуту.

3. Длительное применение безотвальных обработок приводит к четкой дифференциации 0-30 см слоя почвы. Достоверное увеличение каталазной активности отмечено в 0-10 см слое



почвы 3,0 -3,1 мл O₂/1г почвы в минуту в сравнении с более глубокими слоями почвы, которая составила 2,8-2,9 мл O₂/1г почвы в минуту.

4. Более высокая урезающая активность отмечена на паровом поле, которая через 24 час. экспозиции была максимальной на мелкой безотвальной обработке – рН 8, а через 48 час. над почвой с мелкой обработкой и вспашкой – рН 10.

5. На посевах озимой пшеницы урезающая активность была равнозначна на всех вариантах приемов обработки почвы.

Литература

1. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев; Рос. акад. наук, Уфим. науч. центр. Ин-т биологии. - Москва: Наука, 2005. - 251 с.

2. Лыков А. М. Воспроизводство плодородия почв в Нечерноземной зоне / А. М. Лыков. - М.: Россельхозиздат, 1982. - 143 с.

3. Методы почвенной микробиологии и биохимии: [Учеб. пособие по спец. "Агрохимия и почвоведение" / И. В. Асеева и др.]; Под ред. Д. Г. Звягинцева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГУ, 1991. – 302 с.

4. Аристовская Г.В., Чугунова М.В. Экспресс-метод определения биологической активности почвы // Почвоведение. 1989.- № 11.- С. 142-147.

5. Методы исследования физических свойств почв: [учебное пособие по специальности "Агрохимия и почвоведение"] / А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Агропромиздат, 1986. - 415 с.

6. Медведев В.В. Критерии оценки пригодности земель Украины для возделывания зерновых культур /В.В. Медведев [и др.] //Почвоведение. – 2002. - №2. – С. 216-227.

7. Ресурсы адаптации агротехнологий в различные по метеоусловиям годы / А. А. Корчагин [и др.] // Земледелие. - 2017. - № 1. - С. 16-20.



УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ И АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ ЗНАМЕНСКОГО РАЙОНА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПЕРЕПОЛИВОВ ИХ НАВОЗНЫМИ СТОКАМИ

Красина Т.В. Степанцова Л.В. Красин В.Н. Хованова Л.В.

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, РФ, krasina06@yandex.ru

CHANGE OF AGRO-PHYSICAL AND AGROCHEMICAL PROPERTIES OF CHERNOZEMS OF TYPICAL
ZNAMENSKY DISTRICT OF THE TAMBOV REGION UNDER THE INFLUENCE OF THROWN BY THEIR
CAROS

Krasina T.V. Stepanцова L.V. Krasin V.N. Khovanova L.V.
FSBEI HE Michurinsk SAU, Michurinsk, RF

Annotation: chernozems of the Tambov region have a high ability to self-cleaning and after one season they restore the agrochemical parameters optimal for plants. However, the degradation of organic matter, the structure and the water-physical properties of chernozems is irreversible.

Введение

Тамбовская область занимает третье место после Белгородской и Курской среди регионов России по поголовью свиней на 1 января 2017 года (990,8 тыс. голов). Интенсивное развитие свиноводства сопровождается увеличением использования бесподстильного навоза, который транспортируют на участки внесения по системе трубопроводов. Исследования показали, что с увеличением норм использования животноводческих стоков в почвах накапливаются подвижные формы тяжелых металлов, в грунтовые воды вымываются нитраты, фосфаты, аммоний, ухудшаются водно-физические свойства почвы (Тиво, 2015). О.П. Неверова и др. (Неверова, 2015) установили, что при норме внесения - 800 м³/га жидких навозных стоков биологическое загрязнение устраняется в течении 3-х месяцев за счет самоочищающейся системы почвы, при увеличении нормы полива до 1600 м³/га процессе самоочищения не заканчивался за вегетационный период. В Великобритании нормативами установлен максимальный объем внесения жидкого навоза – 55 м³/га. При этом периодичность внесения не должна превышать 1 раз в месяц, общий объем не более 300 м³/га в год.

В Белгородской области разработан технологический регламент (Правила эксплуатации, 2014; Чекмарев, 2014) который запрещает внесение органических удобрений зимой, рекомендует их заделку в почву не позже, чем через 2 часа после внесения, требует научно-обоснованного расчета доз и исключает их систематическое использование на одних и тех же участках. Однако на практике эти нормы зачастую нарушаются, и на следующий год после внесения навозных стоков наблюдается гибель или сильное угнетение сельскохозяйственных культур. Особенно сильно страдают такие важные для АПК сельскохозяйственные культуры как сахарная свекла и озимая пшеница.

Объекты и методы

Цель настоящей работы: выделить стадии восстановления черноземов типичных Тамбовской области после их переполивов навозными стоками и оценить влияния переполивов на агрофизические и агрохимические свойства почв.



В 2016-2017гг. нами было обследовано более 1 тыс. га пашни Знаменского района Тамбовской области, на которые вносились высокие нормы жидких стоков свиноводческих комплексов. Основной почвенный покров представлен черноземом типичным. Это наиболее плодородные высокогумусные, с благоприятными для растений физическими и физико-химическими свойствами, хорошо обеспеченные всеми элементами питания почвы

Для сравнительного анализа изменения свойств и протекающих процессов, а также выявления необратимых изменений чернозема типичного было выбрано 4 группы полей, находящихся на разных стадиях восстановления.

Результаты

На первой стадии (2-3 недели после внесения высоких доз навозных стоков) на поле повсеместно видны лужи навозных стоков или навозной жижи. Полив только что закончился, еще не убрана с полей система трубопроводов, почва переувлажнена, пахотный горизонт утрачивает зернистую структуру, она становится глыбистой. На этой стадии отмечается гибель всех растений, включая многолетние. За счет аммонификации органических остатков в почве резко возрастает содержание аммония, и реакция становится слабощелочной. Брожение свежего органического материала способствует резкому в 8-10 раз повышению подвижности марганца и цинка, возрастает в 5-6 раз содержание водорастворимого бора. Содержание сульфатной серы возрастает в 4-5 раз, доступного растениям фосфора и калия в 8-10 раз. Минерализация водной вытяжки из почвы возрастает в 2-2,5 раза по сравнению с типичным черноземом. Среди катионов в почвенном растворе резко возрастает роль аммония, среди анионов - нитратов.

На второй стадии (от 2-3 недель до 1,5-2 месяцев после прекращения поливов) почва еще переувлажнена, растения отсутствуют или сильно угнетены. Структура почвы становится призматической. В почве активно протекают процессы нитрификации, о чем свидетельствует снижение содержания аммония в почве и резкое возрастание нитратов, кроме нитратов в почвенном растворе появляются нитриты. На этой стадии за счет активного разложения снижается содержание органического вещества в почве.

Процессы нитрификации способствуют подкислению почвы. Содержание фосфора, калия и сульфатной серы достигает максимальных значений, появляются их водорастворимые формы. Сумма солей в водной вытяжке составляет 0,5%, что соответствует средней степени засоления. Именно на этой стадии максимальна вероятность загрязнения грунтовых и поверхностных вод.

Третья стадия наступает тогда, когда влажность почвы становится ниже ППВ. На этой стадии все процессы брожения и разложения органического материала заканчиваются, на поверхности почвы видны только отдельные следы переполивов и начинается восстановление почвы. Высокое содержание элементов питания, особенно азота, ведет к бурному развитию сорной растительности, что в свою очередь способствует снижению в 2-3 раза содержания нитратов, подвижного фосфора и калия в пахотном горизонте. Следует отметить что в подпахотном горизонте очень высокое содержание элементов питания сохраняется даже на IV стадии восстановления. В меньшей степени снижается содержание подвижной серы и микроэлементов.

Несмотря на то, что основные агрохимические показатели на второй сезон после внесения высоких доз навозных стоков приходят в оптимальные для сельскохозяйственных культур значения, в почве накапливается ряд негативных необратимых изменений. Среди них



можно отметить как легко восстанавливаемые, например – повышенная кислотность почвы, которую повсеместно на полях области устраняют внесением дефеката, так и трудно восстанавливаемые. Ко вторым относится снижение содержания гумуса, деградация структуры, вымывание ила из пахотного горизонта и ухудшение водно-физических свойств.

Таблица 1. Сравнительная характеристика свойств черноземов типичных на разных стадиях восстановления после переполивов навозными стоками свиноводческих комплексов

| Показатель | Типичный чернозем | Стадии восстановления | | | |
|-------------------------------|---------------------|---|--|--|---|
| | | I – начало разложения - сразу после внесения. | II – накопление продуктов разложения - 2-3 недели после внесения | III – восстановление и очищение почвы – 1-2 месяца | IV – нормализации почвенных процессов – следующий год |
| Внешний вид поля | Пашня | Повсеместно лужи навозных стоков | Единичные лужи, полигонально растрескавшиеся участки застоя стоков | Многочисленные сухие остатки навозных стоков | Единичные участки сухих остатков навозных стоков |
| Растительность | Нормальное развитие | Отсутствует или мертвые растения | Единичные сильно угнетенные растения | Бурьян до 2 м высотой | Нормальное развитие |
| Структура пахотного горизонта | Комковато-зернистая | Глыбистая, слитая | Призматическая | Глыбисто-комковатая | Комковато-пылеватая |
| Распределение ила по профилю | Равномерное | Вымывание ила из пахотного слоя и его накопление в слое 30-60 см, разница по содержанию ила 8-12%, по физической глине 10-15% | | | |
| pH вод | 7,6-7,8 | 8,10-8,40 | 6,2-6,9 | 6,8-7,0 | 7,3-7,4 |
| pH сол | 6,3-6,4 | 7,40-7,90 | 5,2-5,6 | 5,8-6,0 | 6,2,6,4 |
| Гумус, % | 6,8-7,0 | 6,8-7,6 | 5,6-6,2 | 5,6-6,3 | 5,4-6,0 |
| Содержание солей, % | менее 0,1 | 0,20-0,25 | 0,30-0,50 | 0,45-0,60 | 0,05-0,25 |
| P2O5 | 15-20 | 140-200 | 200-300 | 80-120 | 30-50 |
| K2O | 15-30 | 100-200 | 150-250 | 80-150 | 20-50 |
| NO3 | 2-5 | 50-150 | 200-300 | 50-150 | 10-100 |
| NH4 | Нет | 100-300 | 20-30 | 5-50 | 1-4 |
| SO4 | 5-10 | 20-50 | 60-150 | 40-60 | 15-50 |
| Mn | 8-12 | 90-110 | 50-80 | 30-80 | 30-80 |
| Zn | 0,6-1,0 | 5-15 | 6-8 | 0,9-2,0 | 0,9-2,0 |
| B | 0,8-1,2 | 3,6-4,2 | 1,5-3,0 | 1,5-3,0 | 1,5-3,0 |

Хотя на первой стадии содержание органического вещества в почве, пропитанной навозными стоками, даже несколько возрастает по сравнению с неорошаемым черноземом типичным, но после активного микробиологического разложения на второй стадии – его



содержание снижается на 0,5-0,8%. Ни на одном из обследованных полей содержание гумуса не было выше, чем на неорошаемых участках.

Почва после переполивов утрачивает зернистую структуру. В переувлажненном состоянии в начальных стадиях она призматическая, а после обработок и высыхания расплывается. В результате на полях активно протекает дефляция.

Обеднение пахотного горизонта илистыми частицами и их накопление в слое 30-60 см, способствует формированию плужной подошвы, а, следовательно, и снижению коэффициента вертикальной фильтрации почвы. Это приведет при следующем цикле полива навозными стоками к более длительному их застою в пахотном горизонте и более сильной деградации почвы.

Выводы

1. Внесение высоких доз навозных стоков в черноземы типичные сопровождается существенными изменениями их физико-химических свойств и агрохимических показателей: содержание в почве нитратов, аммония, подвижного фосфора и обменного калия, сульфатной серы может достигать 200-300 мг/100 г почвы, в 5-6 раз увеличивается подвижность микроэлементов, общее содержание солей в почве достигает 0,5-0,6%.

2. Можно выделить 4 стадии восстановления черноземов после переполивов навозными стоками: I – стадия интенсивного брожения органического материала и накопление в почве аммония, II – стадия нитрификации и максимального накопления в почве солей, III – стадия вымывания, когда содержание в почве солей высоко, но уже не токсично для растений, IV – стадия восстановления нормальных для почвы значений агрохимических показателей.

3. Внесение высоких доз навозных стоков ведет к деградации и уменьшению содержания органического вещества черноземов.

4. Внесение высоких навозных стоков сопровождается деградацией структуры черноземов - сначала в глыбисто-призматическую, потом - в пылеватую. Это способствует вымыванию и выдуванию илистых частиц из пахотного горизонта.

Благодарность

Исследования проводились на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ.

Литература

1. Неверова О.П., Ильясов О.Р., Зуева Г.В., Шаравьев П.В. Современные методы утилизации навозосодержащих и сточных вод // Аграрный Вестник Урала, №1. 2015. С.86-90.
2. Правила эксплуатации земледельческих полей орошения животноводческими стоками. Мелиоративные системы и сооружения. Эксплуатация. Свод правил. Москва, 2014. 29с.
3. Тиво П.Ф., Анжеников А.С., Саскевич Л.А. Снижение загрязнения окружающей среды при внесении бесподстилочного навоза // Мелиорация, №1 (73), 2015. С. 137-149.
4. Чекмарев П.А., Родионов В.Я., Лукин С.В. Применение органических удобрений в Белгородской области // Техника и оборудование для села, № 9. 2011. С.31-33.



УДК 631.46: 579.8.04

ФИЛЬТРУЮЩИЕСЯ ФОРМЫ ПРОКАРИОТ И БАКТЕРИОФАГИ В ПОЧВЕННЫХ КОНКРЕЦИЯХ

Лысак Л.В., Лапыгина Е.В., Соина В.С., Чекин М.Р.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

lvlysak@mail.ru

FILTERED FORMS OF PROKARIOTES AND BACTERIOPHAGS IN SOIL CONCRETIONS

Lysak L.V., Lapygina E.V., Soina V.S., Chekin M.R.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: Soil concretions are a special soil locus, where the total numbers and the content of viable bacterial cells are comparable or higher than in the including horizon. In magnetic and non-magnetic concretions of cultivated sod-podzolic, sod meadow and alluvial meadow soils, a significant proportion of bacteria (up to 40%) is represented by filtered forms of prokaryotes (FFP).

Введение

Значительная роль микроорганизмов в образовании почвенных железомарганцевых конкреций является общепризнанной. Показано участие микроорганизмов в образовании железосодержащих (железистых) минералов в почве (Водяницкий, 2010). Описаны и изучены различные группы прокариот, способные участвовать в процессах превращения железа и марганца в природных условиях и чистых культурах (Пиневиц, 2005). Однако, несмотря на имеющиеся в литературе сведения, участие микроорганизмов в процессах образования почвенных конкреций изучено явно недостаточно. Ранее высказывалось предположение, что фильтрующиеся формы прокариот (ФФП) являются активными участниками процессов биоминерализации в минеральных источниках, некоторых горных породах и организме человека (Panikov, 2005). Однако остается неясным, какие именно бактериальные таксоны находятся в состоянии ФФП в почвенных конкрециях. Решение этого вопроса значительно расширило бы наши знания об участии бактерий в процессах превращения железа и марганца в почве.

В соответствии с вышесказанным, целью нашей работы было изучение численности, жизнеспособности и таксономического состава ФФП в конкрециях дерново-подзолистой, дерновой луговой и аллювиальной луговой почв с использованием современных методов почвенной микробиологии.

Объекты и методы

Объектами исследования служили образцы вмещающего горизонта и конкреции из горизонта E окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на покровном суглинке (Московская обл., УОПЭЦ МГУ «Чашниково»). Анализировались также образцы магнитных и немагнитных конкреций из вмещающего горизонта (A') дерновой луговой почвы на двучленных аллювиальных отложениях (поймы р. Клязьма, УОПЭЦ «Чашниково»). Конкреции получали методом мокрого просеивания с последующим ручным отбором. Магнитные конкреции извлекали методом сепарации с помощью ручного магнита. Анализировали также вмещающий горизонт и аморфные железистые образования (секреции) аллювиальной луговой кислой грунтово-ожелезнённой легкосуглинистой почвы (УОПЭЦ «Чашниково»).



Для обнаружения фильтрующихся форм прокариот (ФФП) и бактериофагов использовали разработанный нами метод фильтрации почвенной суспензии через ядерные мембранные фильтры (Фирма «Sarstedt») с размером пор 220 нм с последующей концентрацией клеток центрифугированием (Лысак и др., 2010). Общую численность бактерий, а также численность ФФП определяли с помощью акридина оранжевого с использованием люминесцентного микроскопа «Axioskop 2+» (объектив x100, масляная иммерсия) (Методы почвенной микробиологии и биохимии, 1991). Численность бактериофагов определяли с помощью окраски красителем SIBR green (Лапыгина и др., 2016). Жизнеспособность бактерий определяли с помощью флуоресцентного двухкомпонентного красителя L7012 (LIVE/DEAD BacLight bacterial viability kit.) (Molecular Probes, 1994) в соответствии с рекомендациями производителя. Таксономический состав на уровне филумов определяли молекулярно-биологическим методом FISH при помощи *in situ* гибридизации с рРНК-специфичными олигонуклеотидными маркерами, мечеными флуоресцентными красителями (Манучарова, 2008). Морфологию клеток ФФП и бактериофагов изучали в трансмиссионном электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение

ФФП были обнаружены во всех исследованных образцах конкреций. Численность их в конкрециях из дерново-подзолистой почвы составляла 0.76 – 0.86 млрд. клеток в 1 г почвы, доля от числа всех учитываемых клеток бактерий составляла 29 %. Численность ФФП в конкрециях была выше, чем во вмещающем горизонте Е (0.73 млрд. клеток в 1 г), а доля выше, чем во вмещающем горизонте (41%). Содержание жизнеспособных клеток среди ФФП было довольно высоким (88 - 99%). Эти результаты согласуются с ранее полученными данными по определению жизнеспособности ФФП в некоторых почвах России (Лысак и др., 2010). Значительное содержание жизнеспособных клеток в конкрециях (до 99%) позволяет предположить их активное участие в процессах минерализации в этом почвенном локусе. ФФП были обнаружены в образцах конкреций дерновой луговой почвы. Численность ФФП была выше в немагнитных конкрециях (0.63 млрд. клеток в 1 г) и ниже в магнитных конкрециях (0.41 млрд. клеток в 1 г), при этом доля ФФП была выше в конкрециях, чем во вмещающем горизонте (29 – 35% и 21% соответственно). Обращает на себя внимание высокая доля жизнеспособных клеток среди ФФП бактерий, в немагнитных (95%) и магнитных (88%) конкрециях, т. е. наблюдаются те же закономерности, что и для конкреций из дерново-подзолистой почвы.

Иные закономерности были получены при изучении образцов аморфных железистых образований (секреций) и вмещающего горизонта Vfe аллювиальной луговой почвы. Численность ФФП была ниже, чем в дерново-подзолистой и дерновой луговой почвах, составляла 0.3 и 0.2 млрд. клеток в 1 г соответственно, а содержание как в железистых секрециях, так и во вмещающем горизонте не превышало 10%.

Численность ФФП в конкрециях и секрециях была сравнима с численностью во вмещающем горизонте. При этом содержание в исследованных образцах конкреций была всегда выше, чем во вмещающем горизонте. Доля жизнеспособных клеток среди ФФП в конкрециях и секрециях была всегда выше, чем во вмещающем горизонте, что свидетельствует об их высокой физиологической активности.

Принадлежность полученных при помощи метода фильтрации клеток к ФФП подтверждена при изучении их в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ). Подавляющая часть клеток имела диаметр от 120 до 200 нм и длину не более 300 – 400 нм (реже 500 – 600 нм), что позволяет отнести их к ФФП (Кадулин и др., 2012). Среди



фильтрующихся форм, наблюдаемых нами в магнитных и немагнитных конкрециях, преимущественно выявлялись микоплазмоподобные формы, которые по морфологическим признакам находятся в активном состоянии и могут участвовать в образовании конкреций. Полученные нами данные сходны с имеющимися в литературе описаниями сапрофитных видов микоплазм, которые, наряду с обычными по размеру формами бактерий, способны образовывать в определенных условиях фильтрующиеся формы, участвующие в процессах оруднения (Балашова, 1974). В фильтрах почвенной суспензии с помощью окраски препаратов высокочувствительным красителем SIBR green были обнаружены также бактериофаги (Лапыгина и др., 2016). Численность бактериофагов в конкрециях была сравнима с численностью ФФП и доходила до 0.9 млрд. в 1 г. Методом ПЭМ показано, что преобладали хвостатые фаги, меньше обнаруживалось нитчатых форм бактериофагов.

Известно, что в процессах превращения железа и марганца в почвах участвуют представители разных таксономических групп (филумов) прокариот (Пиневиц, 2005): *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Gammaaproteobacteria*, *Deltaproteobacteria*, *Acidobacteria* и *Planctomycetes*. При помощи метода FISH показано, что в конкрециях дерново-луговой почвы среди ФФП доминируют *Gammaaproteobacteria*, среди бактерий обычного размера *Gammaaproteobacteria* и *Alphaproteobacteria*. В магнитных и немагнитных конкрециях дерново-луговой почвы среди ФФП доминируют *Deltaproteobacteria*, среди бактерий обычного размера доминанты иные. В секрциях аллювиально-луговой почвы среди ФФП доминировали *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria* и *Planctomycetes*. Обращает на себя внимание присутствие среди ФФП в значительных количествах (дерново-луговая и аллювиально-луговая почвы) филумов *Acidobacteria* и *Planctomycetes*, среди которых много активных трансформаторов железа (Пиневиц, 2005). Представители этих филумов с трудом культивируются на питательных средах, поэтому обнаружение и изучение их при помощи метода FISH представляется весьма правомерным и перспективным.

Полученные результаты позволяют предположить, что в процессах образования конкреций участвует не один род бактерий (хорошо известные *Galionella*, *Pedomicrobium*, *Metallogenium*), а также и представители других родов бактерий, потенциально способных к осуществлению этого процесса трансформации железа. Это предположение представляется весьма логичным в свете ранее сформулированного в почвенной микробиологии «принципа дублирования». В настоящее время нет единого мнения в отношении процесса нанотрансформации у бактерий. Это явление рассматривается рядом авторов как ответная реакция прокариот на внешние стрессовые воздействия (Panikov, 2005). Однако несомненно, что именно ФФП, участвующие в процессах превращения железа в почвах, представляют собой значительную часть «молчаливого сообщества почвенных бактерий», находясь в жизнеспособном некультивируемом (или трудно культивируемом) состоянии.

Выводы

Характерными особенностями прокариотного сообщества магнитных и немагнитных конкреций дерново-подзолистой и дерновой луговой почв является более высокая, чем во вмещающем горизонте, численность и жизнеспособность ФФП, а также своеобразный таксономический состав прокариотных сообществ на уровне филумов. Среди ФФП обнаруживаются те же филумы, что и среди бактерий более крупного размера. Очевидно, что в условиях лимитированного по многим показателям роста бактерий происходит измельчение клеток.

Среди ФФП в прокариотном сообществе конкреций дерново-подзолистой почвы выявлено доминирование филума *Proteobacteria* (класс *Gammaaproteobacteria*), в дерновой



луговой почве доминирует филум *Proteobacteria* (класс *Deltaproteobacteria*). В аллювиальной луговой в значительных количествах обнаружены филумы *Acidobacteria* и *Proteobacteria* (классы *Alphaproteobacteria* и *Betaproteobacteria*).

Среди фильтрующихся форм прокариот, наблюдавшихся нами в магнитных и немагнитных конкрециях, преимущественно выявлялись микоплазмоподобные формы, которые по морфологическим признакам находятся в активном состоянии и участвуют в процессах образования конкреций

Впервые в конкрециях из дерново-подзолистой почвы были обнаружены бактериофаги. Численность бактериофагов была сравнима с численностью ФФП и доходила до 0.9 млрд. в 1 г. Методом ПЭМ показано, что преобладали хвостатые фаги, меньше обнаруживалось нитчатых форм бактериофагов.

Проведенные исследования указывает на важную роль ФФП, населяющих отдельные почвенные микролокусы, в микробных сообществах и требуют проведения дальнейшей работы по изучению их роли в этих сообществах.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком таксономическом и морфологическом разнообразии фильтрующихся форм прокариот и бактериофагов в почвенных конкрециях и широком распространение ФФП в отдельных локусах почв.

Литература

- Балашова В.В. (1974) Микоплазмы и железобактерии. М. «Наука», 65 с.
- Водяницкий, Ю.Н. (2010) Гидроксиды железа в почвах (обзор литературы) // *Почвоведение*. № 11. С. 1341-1352
- Лысак Л.В., Лапыгина Е.В., Конова И.А., Звягинцев Д.Г. (2010) Численность и таксономический состав наночастиц бактерий в некоторых почвах России // *Почвоведение*. № 7. С. 1–6.
- Манучарова Н.А. (2008) Идентификация метаболически активных клеток прокариот в почвах с применением молекулярно-биологического флуоресцентно-микроскопического метода анализа fluorescence in situ hybridization (FISH) // *Учебное пособие*. М.: Издательство МГУ, 24 с.
- Методы почвенной биохимии и микробиологии. Ред. Звягинцев Д.Г. // М.: Издательство Московского университета. 1991. 304 с.
- Пиневиц А.В. (2005) Микробиология железа и марганца. Издательство Санкт-Петербургского университета. 373 с.
- Molecular Probes, Inc. (1994). LIVE/DEAD BacLight bacterial viability kit (L 7012), *instruction manual with appendix*. Molecular Probes, Inc., Eugene, Oreg.
- Panikov N. (2005) Contribution of nanosized bacteria to the total biomass and activity of a soil microbial community // *Advances in Applied Microbiology*. V. 57. P. 245–296.
- Лапыгина Е.В., Лысак Л.В., Москвина М.И., Звягинцев Д.Г. (2016) Численность вирусов в аллювиально-дерновой почве (метод прямой эпифлуоресцентной микроскопии) // *Микробиология, Академиздатцентр "Наука" (Москва)*, том 85, № 6, с. 748-751
- Кадулин М.С., Конова И.А., Лысак Л.В., Соина В.С., Лапыгина Е.В., Звягинцев Д.Г. (2012) Наночастицы бактерий в некоторых почвенных конкрециях. Журнал *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), № 1, с. 43-50



УДК 631.46

МЕТАБОЛИЧЕСКИ АКТИВНЫЙ ПРОКАРИОТНЫЙ КОМПЛЕКС НЕКОТОРЫХ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ РОССИИ

Манучарова Н.А., Власова А.П., Каримов Т.Д., Зенова Г.М., Степанов А.Л.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
manucharova@mail.ru

METABOLICALLY ACTIVE PROKARYOTIC COMPLEX OF SOME RUSSIA'S SOILS UNDER OIL- CONTAMINATED

Manucharova N.A., Vlasova A.P., Karimov T.D., Zenova G.M., Stepanov A.L.
Lomonosov Moscow State University

Annotation: The use of modern complex molecular biological approach with the use of metabarcoding contributed to the study of biodiversity of metabolically active prokaryotic complex of oil-contaminated soil microcosms.

В настоящее время, только на территории России, масштабы загрязнения почв нефтью в результате деятельности транспортных предприятий, добычи и транспортировки достигают нескольких сотен тысяч гектар. Следствием воздействия нефти являются глубокие изменения физических и агрохимических свойств почвы, а также токсический стресс, которому подвергается почвенная биота. Как показывают многочисленные исследования, первыми откликаются на воздействие нефти микробиологические показатели. При загрязнении нефтью происходят адаптация и перестройка функциональной структуры сообщества, оно начинает активную деятельность по окислению углеводов нефти.

Целью настоящей работы является филогенетическая характеристика метаболически активного прокариотного комплекса чернозёма, серой лесной и каштановой почв, загрязнённых нефтью в модельных экспериментах.

Объектами исследования явились образцы гумусовых горизонтов чернозема типичного среднесуглинистого на лессовидных суглинках, каштановой среднесуглинистой на лессовидных суглинках и серой лесной маломощной среднесуглинистой на покровных суглинках. В модельном эксперименте с образцами исследуемых почв основу составлял метод иницированной микробной сукцессии. Инициация происходила путем увлажнения, в случае с контрольным вариантом и увлажнения с внесением нефти в образцы, в случае опытных вариантов. Почвенные образцы увлажнялись водой до 60% от массы почвы. При проведении модельного эксперимента для опытных образцов нефть добавлялась в количестве, превышающем сильнозагрязненные почвы (20% от массы почвы). Эксперимент проводили в течение месяца.

С целью анализа биоразнообразия прокариотного комплекса исследуемых образцов почв применяли молекулярно-биологические методы высокопроизводительного секвенирования консервативного участка гена 16S рНК и флюоресцентно-гибридизационного подхода (FISH).

В загрязненных нефтью почвах формирующихся в разных климатических условиях (серая лесная, каштановая, чернозем) наблюдается значимая перестройка филогенетической структуры метаболически активной прокариотной компоненты микробного комплекса по сравнению с незагрязненными системами. Использование современного молекулярно-биологического подхода с применением метабаркодинга способствовало выявлению в загрязненных нефтью почвенных микрочастицах формирования специфического спектра



бактерий (в котором преобладали гаммапротео- и актинобактерии) и архей (представителей *Thaumarchaeota* и *Crenarchaeota*). В результате оценки родовой принадлежности удалось обнаружить анаэробных, термофильных и ацидофильных бактерий, что может быть полезно с точки зрения биотехнологии. Определены устойчивые и чувствительные к углеводородам нефти представители почвенного прокариотного комплекса. Устойчивыми к нефтезагрязнению среди домена Bacteria выявлялись следующие доминанты: *Nocardiodes*, *Rhodococcus*, *Gaiella*, *Kribella*, *Conexibacter*, *Solirubrobacter*, *Pseudomomocardis*, *Rhodopseudomonas*), среди домена Archaea: *Pyrolobus*, *Sulfurisphaera*, семейство *Thermoproteaceae*.

Чувствительность к загрязнению проявили представители *Firmicutes* семейство *Streptococcaceae-Lactovum*, *Proteobacteria* (Alpha, поды *Mesorhisobuim*, *Nitrobacter*, *Bradyrhizobium*, *Hyphomicrobuim*, *Pedomicrobium*), *Bacteroidetes* (*Pedobacter*, *Mucilaginibacter*)

Исследования подобного характера могут быть полезны при биодиагностике и биоиндикации природных экосистем, а также биотехнологам с точки зрения создания новых биопрепаратов, направленных с одной стороны на деструкцию поллютантов в загрязненных системах, а с другой – получение новых штаммов бактерий – продуцентов антибиотиков, действующих на резистентные формы патогенов.



УДК 631.421.1

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВА ПОЧВЫ ОБСОХШЕГО ДНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ НА РОСТ И ВЫЖИВАНИЕ САКСАУЛА ЧЕРНОГО (HALOXYLON APHYLLUM)

Матсуи К.¹, Ватанабе Т.¹, Кусаинова М.Д.², Фунакава Ш.¹

Высшая школа глобальных экологических экосистем, Университет Киото, Киото, Япония

kayo.matsui122@gmail.com

²Казахский Национальный Аграрный Университет, Алматы, Казахстан

mairakussainova@gmail.com

STUDYING THE EFFECT OF SOIL PROPERTIES TO THE GROWTH AND DEADLINESS OF BLACK
SAXAUL (HALOXYLON APHYLLUM) IN THE ARAL REGION

Matsui K.¹, Watanabe T.¹, Kussainova M.², Funakawa S.¹

¹ Graduate School of Global Environmental Ecosystems, Kyoto University, Kyoto, Japan

² Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan

Annotation: The article presents the results of research of soil properties that determine the mortality of planted Haloxylon aphyll trees in the Aral Sea of Kazakhstan.

Введение

Система крупномасштабного и неэффективного орошаемого земледелия была внедрена Советским Союзом в верховьях рек Сырдарья и Амударья. Эти реки обеспечивали большую часть поступление воды в Аральское море, и истощение этого водоснабжения привело к катастрофическому сокращению озера (Micklin, 2004). Чтобы улучшить растительный покров региона, правительство Казахстана при поддержке международных организаций осуществило много проектов по лесовосстановлению с использованием местных видов деревьев, на примере черного саксаула (*Haloxylon aphyllum* (Minkw.) Iljin), который обладает высокой устойчивостью к засухливости и засолению. (Micklin, 2007).

На многих участках проекта по лесовосстановлению была проведена подготовка почвенного покрова на глубину 25 см, где была использована песчаная почва. Тем не менее, общие результаты по лесовосстановлению не увенчались успехом: выживаемость саженцев составила всего 25% (Meshkov et al. 2009). Несмотря на их усилия по лесовосстановлению, причина низкой выживаемости до сих пор не выяснена.

Правильный выбор участка на основе оценки почвы необходим для экономически эффективного лесовосстановления, что ведет к планируемому лесопользованию в регионе. В этом исследовании были изучены следующие задачи: (1) определение причины неэффективности нынешней обработки подготовки почвы, (2) определить критическую глубину выживания саженцев, и (3) определить факторы влияния на рост деревьев черного саксаула после роста активных корней.

Объекты и методы

Каратеренский сельский округ (45 ° 58'54 "с.ш.; 61 ° 02'50" в.д.) расположен вдоль обсохшего берега моря в устье реки Сырдарья в Приаралье юго-западного Казахстана (Рис. 1). Участок для посадки черного саксаула примыкает к деревне Жана Коныс сельского округа Каратерен. Размер участка составляет 120 × 200 м². Саженцы (1 год) были посажены в 2008



году на 15 рядной посадке (длиной 200 м) с интервалом 1,5 м. Около 1800 деревьев стоят с большим разнообразием по высоте.

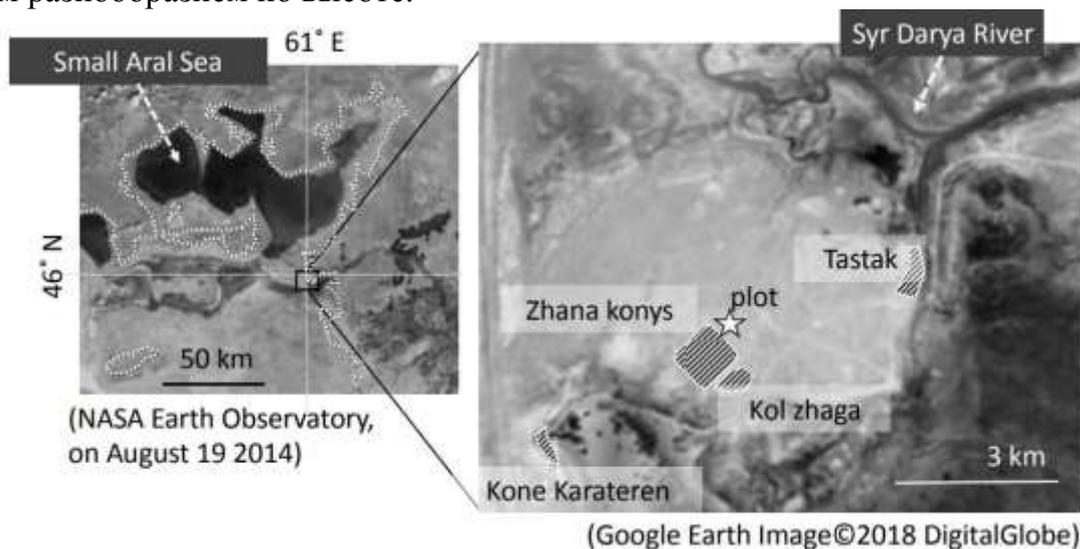


Рис.1. Исследуемый участок

Схема эксперимента

Чтобы объяснить пространственно однородное состояние роста растений, было рассмотрено особое распределение факторов окружающей среды. Факторы, которые рассматривались как объясняющие переменные, включали такие топографические факторы, как относительная высота и глубина твердого слоя, а также физические и химические свойства почвы, такие как механический состав почвы, ЕСе (электропроводность насыщенного раствора), SAR (соотношение натрия в поглощающем комплексе почвы). Классификация водных почвенных экстрактов была основана на критериях Лаборатории солености США (USSL) (Richards, 1954). SAR определяли по следующему уравнению:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{1/2([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}}$$

(Все ионы в мкмоль/л⁻¹)

В этом исследовании высота растения была использована в качестве показателя роста растения, потому что высота растения тесно коррелирует с биомассой в *H. aphyllum* (Buras et al. 2012). В дополнение к выявлению факторов, влияющих на рост, было изучено состояние почвы, необходимое для посадки саженцев, путем сравнения различных моделей профиля почвы среди точек отбора проб с различными показателями выживания.

Отбор почвенных проб

Точки отбора проб показаны на рис.2. Точки отбора проб были выбраны, чтобы покрыть всю область графика для картирования. Чтобы понять общую ситуацию осадения песка и солевых осадков более глубокого профиля почвы в районах с низким или высоким уровнем выживаемости деревьев, были выбраны семь репрезентативных точек (А, В, С, D, E, F и G) для определения текстуры почвы и ЕСе с помощью почвенного бура диаметром 7 см из трех профилей, 0–20 см, 50–60 см и 80–100 см. Образцы почвы в других точках (серый круг) отобрали на глубине 0–20 см и 80–100 см для текстуры почвы и агрохимического анализа. Эти точки отбора были включены для сбора топографических данных.



как группа с высокой смертностью демонстрировала разный результат по составу, как: богатые, полностью (А) или частично (В и С) с содержанием ила и глины. Значения ЕСе были высокими в почвах с высоким содержанием ила и глины и низкими в песчаных профилях. Даже если часть профиля состояло на половину из легкого механического состава, наличие богатых илом и глиной почв влияли решающим значением для выживания деревьев. Эти результаты исследования показали, что высокую выживаемость растений могут дать условия при песчаном профиле на глубину не менее 100 см.

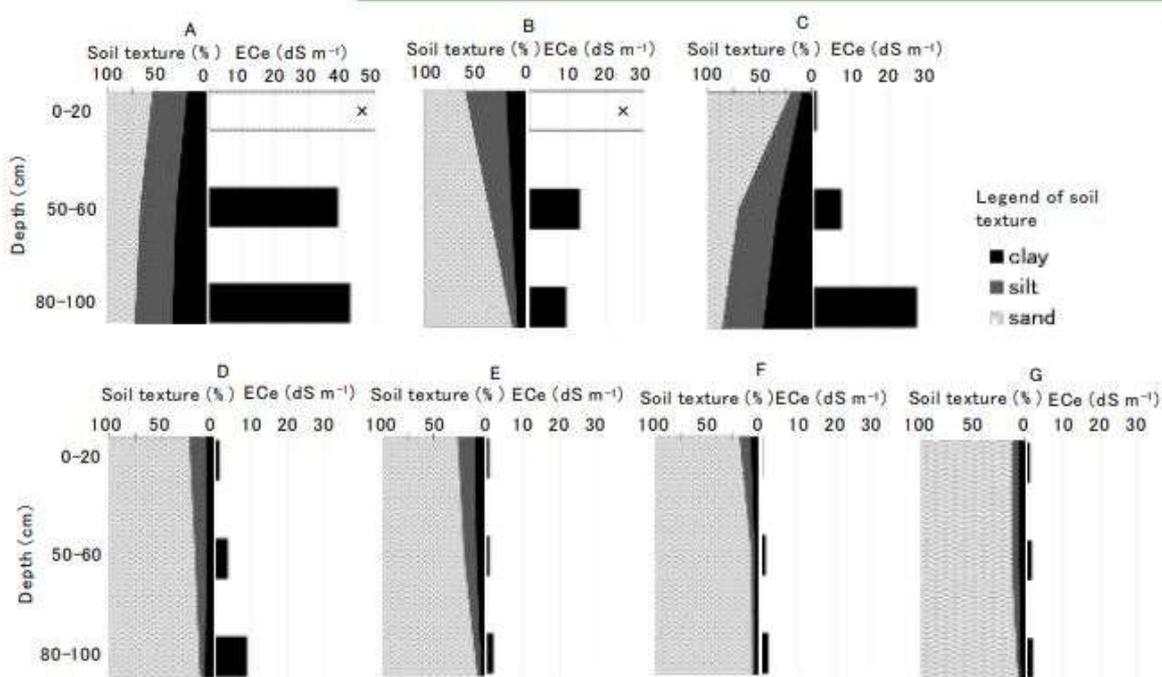


Рис.4. Механический состав почвы и ЕСе в репрезентативных точках отбора проб 'x' в А и В означает, что ЕСе образцов не было показано ЕС-метром, потому что значения были выше верхнего предела измерения.

Взаимосвязь между ростом растений и факторами окружающей среды

Высота живых растений имела значительно положительную корреляцию с глубиной твердого слоя ($p < 0,01$) и соотношением песка и отрицательную корреляцию с ЕСе и SAR (все на глубине 80–100 см, $p < 0,01$). Однако соотношение песка, ЕСе и SAR при 0–20 см и относительной высоте не показывали значимой корреляции с высотой растения. Затем взаимосвязь между этими факторами и высотой растения показана на диаграмме разброса точек (Рис. 5). Тем не менее, большая часть отношений между важными параметрами почвы и высотой растений не являются линейными (см. Рис. 5 (b, d, f)). Использование нелинейных моделей регрессии было бы более оправданным для параметров. Кроме того, модели линейной регрессии искажаются некоторыми выбросами для ЕС на 0–20 см и SAR на 0–20 см (см. Рис.5. (e, g)). Без этих выбросов значения r были бы очень разными. Когда коэффициент смертности точек отбора проб был показан на точечных диаграммах, группу с низким уровнем смертности (0–20%) и группу с более высоким уровнем смертности можно было бы дифференцировать по глубине слоя твердой глины, соотношению песка при 80–100 см, SAR на 80–100 см и ЕСе на 80–100 см, но не по относительной высоте, соотношение песка на 0–



20 см, SAR на 0–20 см и ЕСе на 0–20 см. Эти результаты свидетельствуют о том, что свойства вблизи поверхности почвы не указывают на качество участка, а скорее показывают важность свойств недр.

Была рассчитана средняя высота живых деревьев, стоящих внутри круга радиусом 5 м от точки отбора проб. Объяснительные переменные на восьми графиках: а: относительная высота, b: глубина твердого слоя, с: соотношение песка на 0 - 20 см, d: соотношение песка на 80 - 100 см, e: ЕСе на 0 - 20 см, f : ЕСе на 80 - 100 см, g: SAR на 0 - 20 см и h: SAR на 80 - 100 см. Различные символы представляют уровни смертности (◆: 0%, ◇: менее 50%, × более 50%). 'r' - коэффициент корреляции каждого отношения, определяемый корреляцией Пирсона. * означает значение с $p < 0,01$.

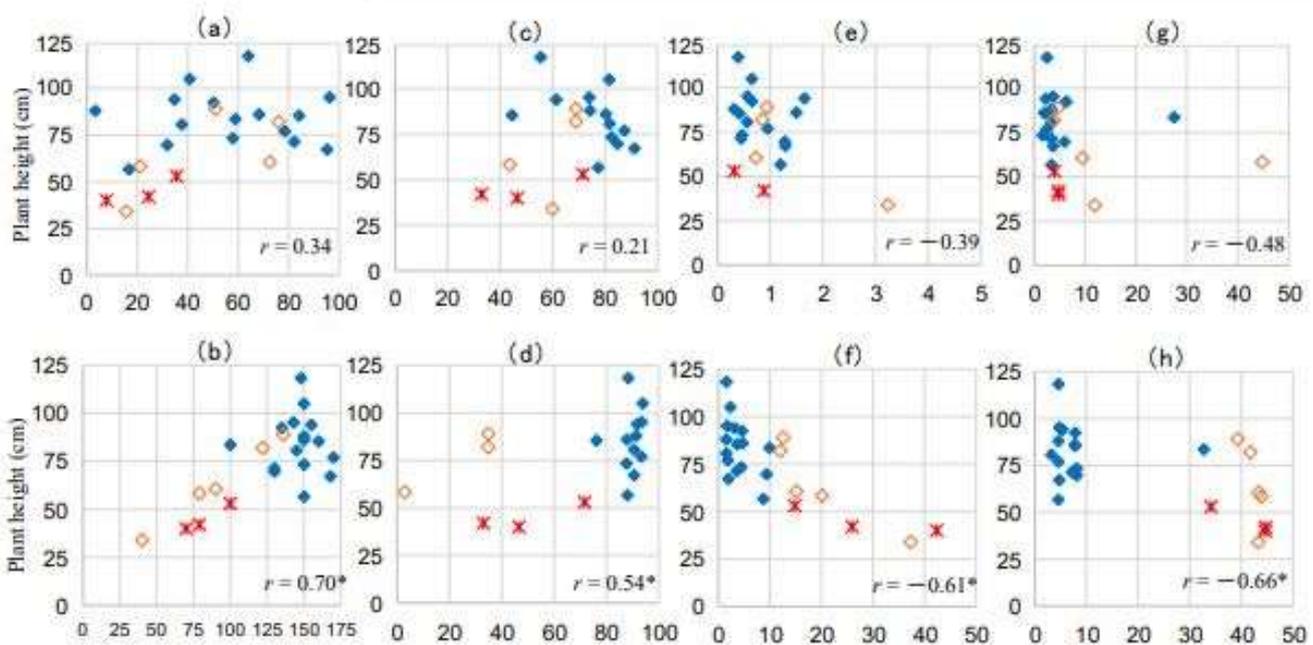


Рис.5. Взаимосвязь между высотой растений и факторами почвы

Выводы

В засушливом регионе Казахстана проект по посадке деревьев с использованием традиционных видов кустарников был продвинут в качестве национальной программы, поддерживаемой международными организациями (World Bank, 2011; FAO 2014). Тем не менее, вероятность успеха низка, и никаких результатов не было достигнуто (Meshkov et al., 2009). Проблема заключается в том, что искусственное улучшение почвы было повторено, игнорируя тесную связь между местной растительностью и естественной почвой. В нашей работе было необходимо чтобы профиль состоял из песчаной почвы на глубину не менее 100 см для выживания саженцев черного саксаула, а концентрация соли с поверхности горизонта почвы не влияет на рост после выживания, хотя было показано, что концентрация соли на глубине от 80 до 100 см оказала значительное влияние. Этот факт неудивителен, но прогрессивно академически почвоведение показало, что метод ленточных почв, который до сих пор поддерживался огромными инвестициями, на самом деле неэффективен. Кроме того, также стало ясно, что крупномасштабная и равномерная посадка неэффективна. Важно знать, в каком масштабе изменяется естественная почвенная среда. На исследуемом участке глубина отложения песка изменяется в полумасштабе на 10 м.



Благодаря посадке деревьев в соответствующих местах в соответствии с масштабами распределения естественной растительности эффективность облесения значительно возрастет. С этой точки зрения рекомендуется проводить предварительную экологическую оценку.

Литература

- Buras A, Wucherer W, Zerbe S, Noviskiy Z, Muchitdinov N, Shimshikov B, Zverev N, Schmidt S, Wilmking M, Thevs N. (2012) Allometric variability of haloxylon species in Central Asia. *Forest Ecology and Management* 274:1–9. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.023
- FAO (2014) Global forest resources assessment 2015. FAO Forestry paper Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-az250e.pdf>
- Meshkov VV, Baizakov SB, Yeger AV, Orozumbekov A. (2009) Forest rehabilitation in Kazakhstan. *IUFRO World Series* 20(4): 83-130. IUFRO Headquarters, Vienna, Austria.
- Micklin, P. (2004) The Aral Sea crisis. In: Nihoul CJ, Zavialov P, Micklin P (Eds) *Dying and dead seas—Climatic versus anthropic causes*. Springer: Netherlands: 99–123. DOI: 10.1007/978-94-007-0967-6_5
- Micklin P. (2007) The Aral Sea disaster. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 35: 47– 72. DOI: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140120
- Richards, L.A. (1969) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agricultural handbook 60. U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C., 160 p
- World Bank (2011) Implementation Status and Results: Kazakhstan Forest Protection & Rehabilitation Project. <http://www.worldbank.org/projects/P078301/forest-protectionreforestation-project?lang=en>



УДК591.5

ВЫЖИВАЕМОСТЬ ГЕОФИЛЬНЫХ ЛИЧИНОК ПЛАСТИНЧАТОУСЫХ ЖУКОВ (COLEOPTERA, SCARABAEIDAE) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ

Минияров Ф.Т.

Биологический факультет АГУ, Астрахань, Российская Федерация

fminiyarov@mail.ru

THE SURVIVAL OF GEOPHILIC LARVAE OF BEETLES (COLEOPTERA, SCARABAEIDAE) WHEN CHANGING THE SOIL TEMPERATURE

Miniyarov F. T.

Astrakhan State University, Astrakhan, Russian Federation

Annotation: One of the topical surveys of soil biota is the identification of soil invertebrate resistance to various environmental factors. The research presents the results of vital activity analysis of geophilic larvae Rose Chafer (*Cetonia aurata* L.). In the course of the research, it was found that with a decrease in soil temperature to 15 °C, the survival rate of the larvae was observed to be no more than 30%.

Введение

Мезофауна почвы играет значительную роль в биологическом круговороте веществ [1, с. 2-5; 3, с. 5-10], в разложении растительных остатков, трансформации органического материала, формировании гумусового горизонта и улучшении структуры почв. Почва создает условия для развития микрофлоры и фауны, которые в свою очередь, оказывают специфическое влияние на почву [6, с. 695; 13, с. 8]. Были проведены исследования по видовому разнообразию мезофауны почвы и ее структуры населения в различных регионах [9, с. 5; 7, с. 6; 5, с. 8]. Следующим вопросом, требующего детального изучения, является выявление устойчивости почвенных беспозвоночных к различным факторам среды. Именно этому вопросу и посвящена наша работа. Цель наших исследований – изучить влияния температуры почвы на выживаемость геофильных личинок пластинчатоусых жуков, на примере золотистой бронзовки (*Cetonia aurata* L.).

Объекты и методы

Объект исследования – золотистая бронзовка (*Cetonia aurata* L.) на стадии личинки в 1 и 2 возрасте. Краткая систематика объекта: Arthropoda: Insecta: Coleoptera: Scarabaeidae: Cetoniinae.

Исследования по данной работе осуществлялись на базе Лаборатории экспериментальной зоологии биологического факультета Астраханского государственного университета. Период исследования: 2016-2018 гг. Отлов животных осуществлялся в плодовых садах г. Астрахани (Ленинский район) и Астраханской области (Камызякский район) с помощью традиционных и усовершенствованных методик исследования беспозвоночных животных [14, с. 424; 2, с. 5; 11, с. 68-75; 15, с. 130; 18, с. 332-340]. Имаго, личинок и куколок жуков содержали в инсектариях (длительное содержание) и садках (эксперименты) (рис. 1). Измерение температуры осуществлялось с помощью ртутных термометров и метеостанции Oregon Scientific (модель VAR268HG).

Всего в экспериментах было использовано по 18 садков, расположенных в боксе лаборатории с контролируруемыми температурными условиями. При закладке личинок 1 и 2



возраста в каждом садке размещалось по 10 экз. Толщина грунта составляла 50 см. Измерение температуры почвы осуществлялась на глубине 20 см от поверхности грунта.



Рис.1. Места лова и содержания личинок бронзовки золотистой (*Cetonia aurata* L.)

Результаты и обсуждение

Краткая морфология вида на стадии личинки. Внешний вид личинки бронзовки золотистой (*Cetonia aurata* L.) в стадии личинки 3 возраста представлен на рисунке 2. Тело имеет толстое, назад сильно утолщенное, не сильно С-образно изогнутое тело, покрытое многочисленными, довольно длинными волосками. Голова поперечная, гладкая, блестящая, буро-желтая. Ноги короткие, с короткими тазиками, заканчиваются длинными цилиндрическими придатками, представляющими видоизмененные коготки и несущими на вершине несколько щетинок. Длина тела от 37 до 58 мм на последней личиночной стадии. Полученные результаты по морфологии личинок бронзовок соотносятся с литературными данными [12, с. 147; 10, с. 34-42; 16, с. 5; 17, с. 170].



Рис.2. Внешний вид личинки бронзовки золотистой (*Cetonia aurata* L.) в последней личиночной фазе

Влияние температуры почвы на развитие личинок бронзовок. По результатам предыдущих исследований [8, с. 111] была определена средняя продолжительность личиночных стадий золотистой бронзовки (*Cetonia aurata* L.) при раннем размножении в естественной среде. Так, личиночная фаза 1 – 2 декада мая при средней температуре почвы 21,3°C; личиночная фаза 2 – 3 декада мая при средней температуре почвы 24,2°C; личиночная фаза 3 – с 1 декады июня по 3 декаду августа.

В связи с этим были выбраны следующие температурные границы: контроль – 23°C; нижняя граница – 15 °C; верхняя граница – 30 °C. Оценка влияния температуры на развитие личинок проводилась по выживаемости (рис.3).



Результаты исследований показали различную выживаемость личинок на 1 и 2 стадии развития. Так, выживаемость личинок 1 возраста при температуре 15 °С (нижняя граница) колебалась от 0 до 30 %, при температуре 30 °С (верхняя граница) – от 10 до 60 %, контроль – от 30 до 80 %. Выживаемость личинок 2 возраста при температуре 15 °С (нижняя граница) колебалась от 0 до 20 %, при температуре 30 °С (верхняя граница) – от 20 до 60 %, контроль – от 40 до 80 %.

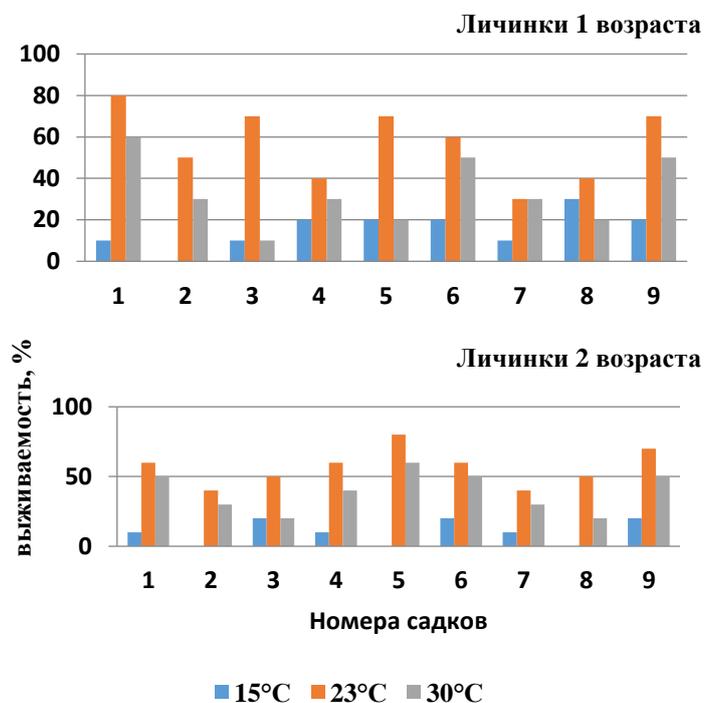


Рис.3. Выживаемость личинок золотистой бронзовки *Cetonia aurata* L.) в зависимости от температуры почвы

Заключение

Согласно полученным данным, личинки 1 и 2 возраста оказались наиболее чувствительны к понижению температуры почвы до 15 °С. Оптимальным для этих стадий развития золотистой бронзовки была температура на уровне 23 °С. При повышении температуры личинки перемещались глубже в толщу грунта, где была более низкая температура.

Литература

1. Акулова Л.И. Животное население (мезофауна) почв среднетаежных луговых экосистем европейского Северо-Востока России: Автореф. дис. канд. биол. наук. Сыктывкар, 2015. 27 с.
2. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
3. Гиляров М. С. Учет крупных почвенных беспозвоночных (мезофауны) // Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. 278 с.
4. Гиляров М.С. Агроценология важное направление биогеоценологии // Природа.1980. №6. с.3-8.



5. Говоров В.В. Почвенно-зоологическая характеристика лесной и степной катен : Автореф. дис. . канд. биол. наук. Воронеж, 2004. 23 с.
6. Добровольский Г.В. Значение почв в сохранении биоразнообразия // Почвоведение. 1996. - №: . - с.694-698.
7. Доржиева О.Д. Структура населения мезопедобионтов Селенгинского среднегорья: Автореф. дис. . канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2002. 19 с.
8. Ержанова З. К., Минияров Ф. Т. Особенности питания бронзовок на стадии имаго в плодовых садах // Зоологические экскурсии по Астраханской области и Тебердинскому заповеднику : материалы науч.-практ. конф. Астрахань : Изд-во АГУ, 2019. С. 111—112.
9. Зенкова И.В. Структура сообществ беспозвоночных животных в лесных подзолах Кольского полуострова: Автореф. дис. . канд. биол. наук. Апатиты, 2000. 33 с.
10. Кабаков О. Н. Пластинчатоусые жуки подсемейства Scarabaeinae (Insecta: Coleoptera: Scarabaeidae) фауны России и сопредельных стран. М. : Т-во науч. изданий КМК, 2006. 374 с.
11. Крыжановский О. Л. Жуки подотряда Aderphaga: семейства Rhysodidae, Trachypachidae; семейство Scarabidae (вводная часть, обзор фауны СССР) / под ред. О. Л. Крыжановского. Л. : Наука, 1983. 342 с. (Фауна СССР. Жесткокрылые. Т. 1, вып. 2).
12. Медведев С. И. Семейство Scarabaeidae (Subfam. Cetoniinae, Valginae). М. ; Л. : Наука, 1964. 375 с. (Фауна СССР. Насекомые жесткокрылые. Т. 10 (5)).
13. Мурашкина А.Б. Биота почвы при биологизации элементов технологии возделывания озимой пшеницы в условиях лесостепи Заволжья: Автореф. дис. . канд. сельхоз. наук. Кинель, 2010. 25 с.
14. Фасулати К. К. Полевое изучение наземных беспозвоночных : учеб. пособие для студ. биол. специальностей ун-тов / под ред. К. К. Фасулати. М. : Высшая школа, 1971. 424 с.
15. Цуриков М.Н., Цуриков С.Н. Природосберегающие методы исследования беспозвоночных животных в заповедниках России: Труды Ассоциации особо охраняемых природных территорий Центрального Черноземья России. Вып. 4. Тула, 2001. 130 с.
16. Шабалин С. А. Личинки пластинчатоусых жуков группы Pleurosticti (Coleoptera: Scarabaeidae) Дальнего Востока России. Владивосток : Дальнаука, 2014. 220 с.
17. Fremlin M. The Rose Chafer *Cetonia aurata* L. (Coleoptera: Scarabaeidae: Cetoniinae) in Essex: distribution and some aspects of its ecology // Essex Naturalist (New Series). 2018. Vol. 35. P. 167—178.
18. Miniyarov F. Applied zoology for forming of research competence at students of biologists // Handbook of research on students' research competence in modern educational contexts. Hershey. PA. USA : IGI Global, 2018. P. 321—341. DOI: 10.4018/978-1-5225-3485-3.ch017.



УДК 631.42(470.53)

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Мудрых Н.М.¹, Хамурджу М.²

¹Факультет почвоведения, агрохимии, экологии и товароведения ПГАТУ, Пермь, Российская
Федерация
nata020880@hotmail.com

²Сельскохозяйственный факультет Университет Сельчук, Конья, Турция
mhamurcu@selcuk.edu.tr

VARIABILITY OF AGROCHEMICAL PROPERTIES OF THE SOILS OF THE PERM KRAY
Mudrykh N.M.¹, Hamurcu M.²

¹Faculty of Soil Science, Agrochemistry, Ecology and Merchandising, PSATU, Perm, Russia
nata020880@hotmail.com

²Faculty of Agriculture Selcuk University, Konya, Turkey
mhamurcu@selcuk.edu.tr

Annotation: The study of the spatial variation of the agrochemical properties of sod-podzolic soils was carried out in two areas. Found that the acid-base properties are more stable than mobile form of elements. Therefore, for the rational use of the resources it is necessary to use elements of precision farming.

Введение

Почвенные факторы можно регулировать в зависимости от требования культуры, тем самым уменьшая или увеличивая влияние остальных факторов для получения оптимального уровня урожайности. Сложившаяся практика земледелия, базирующаяся на усреднении показателей плодородия, на отдельном поле, приводит к возрастанию влияния неоднородности почвенного покрова, которое влечёт за собой нерациональное использование ресурсов хозяйства, а так же неравномерности получаемой на поле продукции. В связи с этим всё большее распространение приобретает точное (координатное) земледелие, которое рассматривает отдельное сельскохозяйственное угодье на уровне дифференцированных участков, различающихся друг от друга по агрономическим свойствам (Шафран, 2011, Савоськина, 2012). Отличительной чертой почвенного покрова является как природная (генетическая) пестрота, так и вызванная различными агротехническими и мелиоративными мероприятиями. Именно поэтому для принятия оптимальных решений по применению удобрений необходимо изучение варьирования агрохимических свойств на отдельных участках поля, оценка тесноты связи между ними и урожайностью сельскохозяйственных культур (Самсонова, 1999, Прошкин, 2010, Coşkun, 2016). Это становится особенно важным при внесении удобрений, которые повышают уровень вариабельности агрохимических показателей почвы настолько, что варьирование, обусловленное естественными факторами, начинает составлять лишь малую долю антропогенного, поскольку из-за низкого уровня агротехники её невозможно снизить (Самсонова, 1999, Литвинович, 2007). Для описания пестроты почвенного покрова, определения её причин и направленности дальнейшего развития используют такие статистические показатели, как: коэффициент вариации и ошибка к нему, стандартное отклонение среднего, медиана, верхние и нижние квартили, показатели асимметрии и эксцесса, а так же стандартные ошибки к ним (Самсонова, 1999, 2008, Дмитриев, 2010, Исаев, 2015).



Цель исследований – выявить изменение свойств почвы в пределах поля для определения степени пространственного варьирования.

Объекты и методы

Исследования проведены в Пермском крае, который включает в себя 6 природно-сельскохозяйственных районов (Самофалова, 2015).

Объект исследования – почвенный покров полей в двух природно-сельскохозяйственных зонах края (рис. 1). Объект № 1. Поля ТОО «Чердынское-2» Чердынского муниципального района (Северный среднетаежный природно-сельскохозяйственный район). Объект 2. Поля ООО «Труженик» Краснокамского муниципального района (Центрально-восточный южно-таежно-лесной природно-сельскохозяйственный район).

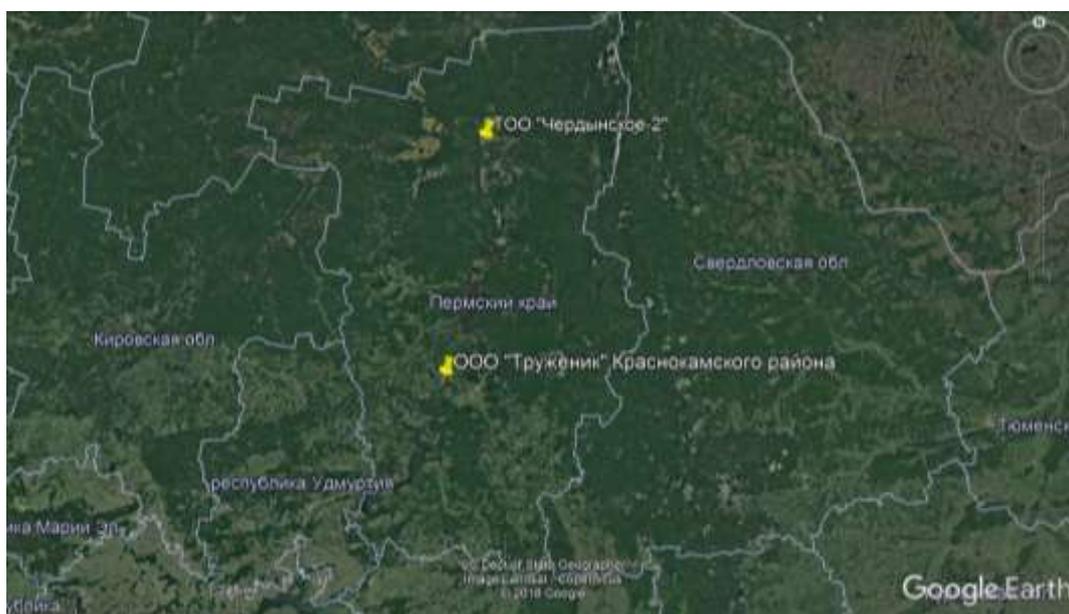


Рисунок 1. Месторасположение объектов исследований

Основной подтип в сельскохозяйственном фонде края – дерново-подзолистые почвы (Коротаев, 1962). На выбранных участках отличительной особенностью этих почв является легкий гранулометрический состав, в основном, легкосуглинистый. Полевой эксперимент проведен с 2015 по 2018 гг., в этот период отобраны смешанные почвенные образцы с глубины 0-20 см по фиксированной сетке 100×200 м на полях площадью 10,1; 12,3; 18,7 га (ТОО «Чердынское-2» 60°22'47.57"С, 56°29'21.88"В) и 64; 42,7; 43,7 га (ООО «Труженик» 58°3'54.89"С, 55°36'52.95"В). Образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и пропускали через сито с отверстиями 2 мм. В почвенных образцах определяли содержание гумуса, гидролитическую и обменную кислотности, сумму обменных оснований, содержание минерального азота, подвижные формы фосфора, калия и марганца. Анализ свойств почв проводили по методикам предусмотренных ГОСТ. Анализ выборки проводили с использованием программ Microsoft Excel и STATISTICA 8.



Результаты и обсуждение

Исследования показали, что в почвах полей ТОО «Чердынское-2» и ООО «Труженик» наиболее стабильной оказалась обменная кислотность, коэффициент вариации составил менее 25 % (табл. 2, 3).

Таблица 1. Некоторые статистические параметры объекта № 1 (N = 18)

| Показатель | Среднее | Медиана | Min | Max | Коэффициент вариации | Верхняя квартиль | Нижняя квартиль | Асимметрия | Экссесс |
|-------------------------------|---------|---------|------|-------|----------------------|------------------|-----------------|------------|---------|
| pH _{KCl} | 5,3 | 5,3 | 4,7 | 6,1 | 6,9 | 1,4 | 1,8 | 0,5 | 0,5 |
| Hг | 1,6 | 1,6 | 0,9 | 2,9 | 26,8 | 7,5 | 10,7 | 1,1 | 2,8 |
| S | 9,8 | 10,1 | 6,0 | 17,7 | 27,2 | 5,0 | 5,4 | 1,3 | 3,7 |
| ЕС | 50,5 | 41,7 | 31,6 | 91,8 | 38,3 | 38,4 | 60,3 | 1,3 | 0,4 |
| N _{мин.} | 19,3 | 14,4 | 5,7 | 72,9 | 79,4 | 12,4 | 20,6 | 2,8 | 9,3 |
| P ₂ O ₅ | 43,8 | 40,9 | 7,7 | 94,5 | 54,3 | 27,8 | 51,4 | 0,8 | 0,2 |
| K ₂ O | 64,7 | 60,5 | 26,5 | 117,0 | 37,4 | 48,4 | 72,2 | 0,9 | 0,5 |
| Mn | 26,8 | 26,4 | 15,7 | 41,7 | 30,1 | 20,8 | 32,0 | 0,5 | -0,8 |

Свойства почвы, имеющие вариацию более 40 %, обладают высокой степенью пространственного варьирования. Минеральный азот на изучаемых объектах имел максимальную изменчивость, коэффициент вариации более 70 %. На втором месте по варьированию оказались подвижный фосфор (объект № 1) и марганец (объект № 2).

Таблица 2. Некоторые статистические параметры объекта № 2 (N = 71)

| Показатель | Среднее | Медиана | Min | Max | Коэффициент вариации | Верхняя квартиль | Нижняя квартиль | Асимметрия | Экссесс |
|-------------------------------|---------|---------|------|-------|----------------------|------------------|-----------------|------------|---------|
| pH _{KCl} | 6,1 | 6,0 | 4,8 | 7,4 | 9,4 | 0,7 | 1,9 | 0,3 | -0,4 |
| Hг | 1,0 | 0,8 | 0,2 | 3,0 | 79,6 | 1,2 | 2,5 | 0,7 | -0,7 |
| S | 18,6 | 18,4 | 6,9 | 26,9 | 26,7 | 9,9 | 25,5 | -0,1 | -0,4 |
| ЕС | 71,8 | 61,5 | 26,0 | 273,1 | 60,7 | 5,1 | 5,6 | 3,1 | 10,3 |
| N _{мин.} | 19,0 | 16,1 | 6,7 | 94,1 | 74,5 | 40,2 | 89,2 | 4,0 | 17,2 |
| P ₂ O ₅ | 402,5 | 385,2 | 42,1 | 813,8 | 28,9 | 8,2 | 20,1 | 0,6 | 1,9 |
| K ₂ O | 235,8 | 226,7 | 84,3 | 670,1 | 41,4 | 45,6 | 166,3 | 1,5 | 4,9 |
| Mn | 22,6 | 19,2 | 2,7 | 77,3 | 71,9 | 49,5 | 114,9 | 1,1 | 1,2 |

Определяя тесноту связи между изучаемыми свойствами почвы установлено, что обменная кислотность на прямую зависит от суммы обменных оснований, причем, чем легче гранулометрический состав, тем теснее связь (табл. 2, 3). Аналогичная зависимость и между обменной кислотностью и уровнем подвижного фосфора.

Таблица 2. Корреляционная зависимость между свойствами почв на объекте № 1 (p < 0,05)

| Показатель | pH _{KCl} | Hг | S | ЕС | N _{мин.} | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Mn |
|-------------------------------|-------------------|---------------|---------------|--------|-------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| pH _{KCl} | 1,000 | -0,795 | 0,869 | -0,202 | 0,163 | 0,559 | -0,440 | -0,123 |
| Hг | | 1,000 | -0,641 | 0,234 | 0,154 | -0,438 | 0,426 | 0,134 |
| S | | | 1,000 | -0,170 | 0,135 | 0,680 | -0,285 | -0,271 |
| ЕС | | | | 1,000 | -0,192 | -0,053 | -0,285 | 0,378 |
| N _{мин.} | | | | | 1,000 | 0,280 | -0,130 | 0,211 |
| P ₂ O ₅ | | | | | | 1,000 | -0,386 | 0,284 |
| K ₂ O | | | | | | | 1,000 | -0,554 |
| Mn | | | | | | | | 1,000 |



Между содержанием подвижного марганца в почве, калием и обменной кислотностью отмечена обратная корреляционная зависимость.

Таблица 2. Корреляционная зависимость между свойствами почв на объекте № 2 ($p < 0,05$)

| Показатель | pH _{KCl} | Hг | S | ЕС | N _{мин.} | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Mn |
|-------------------------------|-------------------|---------------|--------------|--------|-------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| pH _{KCl} | 1,000 | -0,638 | 0,340 | -0,123 | -0,051 | 0,290 | 0,248 | -0,700 |
| Hг | | 1,000 | -0,119 | -0,013 | -0,029 | -0,302 | -0,282 | 0,762 |
| S | | | 1,000 | 0,090 | -0,012 | 0,090 | 0,206 | -0,209 |
| ЕС | | | | 1,000 | 0,276 | 0,039 | 0,258 | -0,042 |
| N _{мин.} | | | | | 1,000 | 0,027 | 0,347 | -0,179 |
| P ₂ O ₅ | | | | | | 1,000 | 0,324 | -0,347 |
| K ₂ O | | | | | | | 1,000 | -0,364 |
| Mn | | | | | | | | 1,000 |

Выводы

Исследования по изучению изменения свойств почвы в пределах полей ТОО «Чердынское-2» и ООО «Труженик» показали, что определяемые показатели изменяются в широких пределах. Коэффициент вариации на полях в северной части Пермского края изменялся от 7 до 79 %, в центрально-восточной – от 9 до 74 %. Наиболее вариabельными на изучаемых объектах были: на первом – минеральный азот и подвижный фосфор, на втором – гидролитическая кислотность, электропроводность, минеральный азот, подвижный калий и марганец. Установлена прямая и обратная корреляционная зависимость между изучаемыми показателями. На первом объекте наиболее тесная связь наблюдается между кислотнo-основными свойствами, в то время как на втором объекте между содержанием подвижного марганца и видами кислотности. Таким образом, на дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава на всех изучаемых полях наблюдается вариabельность агрохимических свойств, что говорит о необходимости дифференцированного подхода к применению удобрений, которое позволит рационально использовать имеющиеся в хозяйствах ресурсы.

Литература

1. Дмитриев Е.А. (2010) Математическая статистика в почвоведении. М. 336 с.
2. Исаев А.В., Демаков Ю.П., Гордеева Т.Х., Бажина А.А. (2015) Вариabельность параметров почвы пойменного биогеоценоза *Научные труды Государственного природного заповедника «Большая Кокшага»* **7**, 41-78.
3. Коротаев Н.Я. (1962) Почвы Пермской области. Пермь. 275 с.
4. Литвинович А.В. (2007) Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв *Агрохимия* **5**, 89-94.
5. Прошкин В.А. (2010) Оценка тесноты и достоверности связи прибавки урожайности озимой пшеницы и агрохимических свойств почвы *АгроЭкоИнфо* **2**, 2-10.
6. Савоськина О.А. (2012) Пестрота почвенного покрова и урожайность многолетних трав на склонах различной крутизны. *Известия ТСХА* **1**, 81-93.
7. Самофалова И.А., Мудрых Н.М. (2015) Агроэкологическая оценка органического вещества в дерново-подзолистых почвах Пермского края: монография. Пермь. 164 с.
8. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. (1999) Структуры пространственной вариabельности агрохимически важных свойств пахотной дерново-подзолистой почвы *Почвоведение* **11**, 1359-1366.



9. Самсонова В.П. (2008) Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. М. 160 с.
10. Шафран С.А. (2011) Внутрипольная вариабельность элементов питания в почвах и ее влияние на урожайность озимых зерновых культур. *Агрoхимия* **2**, 15-23.
11. Coşkun G., Imanverdi E., Feride C., Zeynep D. (2016) Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field *Eurasian J. Soil Sci.* **5 (3)**, 192-200.



УДК 631.1:631.51:631.445.24:631.43

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ

Николаев В.А.¹, Щигрова Л.И.²

¹Кафедра земледелия и МОД РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация
vladimir_nikolaev0202@mail.ru

²Кафедра земледелия и МОД РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация
shchigrova@mail.ru

CHANGE OF AGROPHYSICAL FEATURES OF SODDY PODZOLIC SOIL UNDER INFLUENCE OF DIFFERENT TREATMENT METHODS

Nikolaev V.A.¹, Schigrova L.I.²

¹Department of Farming and MEW, Russian State Agricultural University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

²Department of Farming and MEW, Russian State Agricultural University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

Аннотация: Рассмотрены закономерности изменения агрофизических показателей плодородия при разных по интенсивности системах основной обработки дерново-подзолистой почвы.

Применение вспашки уменьшало плотность пахотного слоя почвы (0-20 см) в среднем до 1,39 г/см³. В то же время с уменьшением интенсивности обработок с помощью прямого посева в пахотном слое увеличивается содержание агрономически ценной фракции (0,25-10 мм) в среднем на 3,9%, по сравнению со вспашкой. Одновременно в этом же слое с 27,6 до 30,4% возрастает количество водоустойчивых (>0,25 мм) агрегатов. При этом урожайность озимой пшеницы на варианте с прямым посевом возрастает на 0,6 т/га, или на 12,2%.

Annotation: The regularities of change of fertility agrophysical indicators at soddy podzolic soil basic treatment systems of different intensity are observed.

Use of plowing reduces density of the arable soil layer (0-20 cm) averagely to 1.39 g/cm³. At the same time along with decrease in intensity of treatments by direct seeding the content of agronomically valuable fraction (0.25-10 mm) in the arable layer increases by an average of 3.9%, as compared to plowing. In the meantime the number of waterproof (>0.25 mm) units grows up from 27.6 to 30.4% in the same layer. This being said, yield of winter wheat in the option of direct seeding increases for 0.6 t/ha, or 12.2%.

Введение

Одним из основных факторов высокой и стабильной продуктивности сельскохозяйственных растений и устойчивости земледелия является оптимизация питательного, водного и воздушного режимов почвы с учетом биологических особенностей возделывания культур и почвенно-климатических условий [2].

В этой связи для временного или коренного улучшения физических свойств почвы для зон недостаточного увлажнения разрабатывают приемы, способствующие накоплению и сохранению влаги. В зоне избыточного увлажнения агротехнические и мелиоративные мероприятия, наоборот, должны быть направлены на уменьшение содержания влаги в почве и увеличение ее аэрации [6].

Благоприятные физические свойства – основа и необходимое условие реализации потенциального почвенного плодородия для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Важная роль при этом отводится способу, глубине и интенсивности перемешивания почвы, определяющих скорость минерализации и доступность питательных веществ [3].



Целью наших исследований являлось изучение приемов и способов оптимизации агрофизических свойств дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы вследствие снижения интенсивности механического воздействия.

Объекты и методы

Исследования проводились на опытном поле ЦТЗ, в РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева. Объектом исследования являлась дерново-подзолистая легкосуглинистая почва. Изучаемая культура озимая пшеница, которая чередовалась в зернопропашном севообороте: викоовсяная смесь на зеленый корм - озимая пшеница + горчица белая на сидерат – картофель - ячмень. В данном опыте изучали две системы основной обработки почвы – отвальную (ежегодная вспашка на глубину 20-22 см) оборотным плугом Eur Opal- 7 и минимальную (прямой посев на озимой пшенице) сеялкой ДМС-3 (с использованием системы GPS) [1,5]. Почвенные образцы отбирали в два срока (начало и конец вегетации культуры).

При проведении исследований использовали следующие методики:

1. Плотность сложения определяли послойно через 10 см на глубину 30 см, объемно-весовым методом, с помощью бура (цилиндра) А.Н. Качинского, с объемом 200 см³.
2. Агрегатный состав – просеиванием воздушно-сухой почвы на ситовом анализаторе AS-200.
3. Учет урожая полевых культур – сплошным методом (Б.А.Доспехов, 1979 г.).

Результаты и их обсуждение

Плотность почвы, как один из фундаментальных показателей ее плодородия, в вариантах с различной интенсивностью основных обработок непосредственно после их проведения определялась способом и глубиной рыхления (Рис.1).



Рис.1. Плотность почвы под посевами озимой пшеницы, г/см³.

Наиболее рыхлое сложение слоя почвы (0-30 см) наблюдали после вспашки (1,39 г/см³). Следует отметить, что обрабатываемые (0-10 и 10-20 см) слои почвы имели значительно меньшую плотность (1,31-1,38 г/см³) по сравнению с неразрыхленным (20-30 см) слоем, где она составила 1,46 г/см³.



Отсутствие механического воздействия на почву при прямом посеве привело к переуплотнению как пахотного, так и подпахотного слоев в среднем от 1,43 до 1,51 г/см³ по сравнению с аналогичными слоями на вспашке, где плотность сложения была меньше на 0,09 и 0,05 г/см³ соответственно.

Анализ структурного состояния почвы под посевами озимой пшеницы показал, что способ, глубина и интенсивность обработки оказывали влияние на содержание агрономически ценных агрегатов и их водопрочность.

При поверхностной обработке в верхнем слое больше накапливается фосфора и калия, он более оструктурен и имеет лучшие поглощательные свойства [4].

Оптимальное содержание водоустойчивых макроагрегатов, при котором сохраняется устойчивое рыхлое сложение корнеобитаемого слоя почвы должно составлять не менее 40% [7]. В нашем опыте в среднем за вегетационный период наибольшее содержание агрономически ценных агрегатов размером 0,25-10 мм в слое (0-20 см) отмечали на прямом посеве – 50,2%, что на 3,9% выше по сравнению со вспашкой (Таблица 1).

Таблица 1. Структурно-агрегатный состав почвы под посевами озимой пшеницы, 2016 г.

| Культура | Варианты обработки | Слой почвы, см, | Содержание фракций, % | |
|----------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | | Сухое просеивание | Мокрое просеивание |
| | | | Агрономически ценная (0,25-10 мм) | Водопрочная (более 0,25 мм) |
| Озимая пшеница | Прямой посев | 0-10 | 42,7 | 31,2 |
| | | 10-20 | 57,7 | 29,6 |
| | | 20-30 | 54,6 | 29,2 |
| | Отвальная | 0-10 | 34,8 | 30,8 |
| | | 10-20 | 57,8 | 24,4 |
| | | 20-30 | 53,6 | 22 |

Наиболее качественным показателем изменения структуры почвы является содержание водоустойчивых (>0,25 мм) агрегатов. Применение прямого посева способствовало к увеличению количества водопрочной макроструктуры как в пахотном слое в среднем до 30,4, так и в подпахотном – 29,2%, при ежегодной вспашке на глубину 20-22 см содержание водоустойчивых агрегатов снижалось до 27,6 и 22,0% соответственно.

Изучаемые в опыте системы обработки почвы оказали неодинаковое влияние на урожайность озимой пшеницы (Таблица 2).

Таблица 2. Влияние обработки на урожайность озимой пшеницы, 2016 г.

| Культура | Обработка | Урожайность, т/га | НСР ₀₅ т/га |
|----------|-----------|-------------------|---------------------------|
|----------|-----------|-------------------|---------------------------|



| | | |
|----------------|-----|------|
| Прямой посев | 5,5 | |
| Озимая пшеница | | 0,05 |
| Отвальная | 4,9 | |

По нашим данным, ни один из способов обработок не имел существенного преимущества ($НСР_{05}=0,05$ т/га), но отсутствие механического воздействия на почву (прямой посев) повышал сбор зерна озимой пшеницы – на 12,2%, по сравнению с отвальной обработкой.

Выводы

1. Отсутствие механического воздействия (прямой посев) не приводило к значительному ухудшению агрофизических свойств пахотного (0-20 см) слоя почвы.
2. Наиболее благоприятное структурное состояние по содержанию агрономически ценной фракции и количеству водоустойчивых агрегатов корнеобитаемого слоя почвы складывается на варианте с прямым посевом.
3. Разница в урожайности зерна озимой пшеницы между вариантами выделялась в пользу прямого посева.

Список литературы

1. Беленков А.И., Николаев В.А., Шитикова А.В. Агроэкологическая концепция исследований и агрофизические свойства почвы в посадках картофеля полевого опыта ЦТЗ // Агрофизика. – 2011. – №3. – С.5-14.
2. Лошаков В.Г. Севооборот и плодородие почвы. – М.: ВНИИА, 2012. – С.217.
3. Матюк Н.С., Полин В.Д., Николаев В.А. Изменение агрофизических свойств почвы под действием приемов обработки и удобрений // Владимирский земледелец. – 2015. – № 2 (72). – С.12-14.
4. Матюк Н.С., Полин В.Д. Ресурсосберегающие технологии обработки почвы в адаптивном земледелии: - учебное пособие / Н.С.Матюк, В.Д.Полин. – М.: Изд. РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева, 2013. – С.23.
5. Николаев В.А., Мазиров М.А., Зинченко С.И. Влияние разных способов обработки на агрофизические свойства и структурное состояние почвы в центре точного земледелия имени К.А. Тимирязева // Земледелие. – №5. – 2015. – С.18-20.
6. Теории и методы физики почв: Монография. Под ред. Е.В.Шеина и Л.О.Карпачевского. – М.: Гриф и К, 2007. – 616 с.
7. Шеин Е.В., Бондарев А.Г. Агрофизика почв. – М.: МГУ, 2005. – С.61.



УДК 631.46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ И БИОМАССЫ МИКРООРГАНИЗМОВ МЕТОДОМ КАСКАДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Полянская Л.М., Калимова И.В.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, e-mail
lpolyanskaya@mail

DETERMINING THE NUMBER AND BIOMASS OF MICROORGANISMS BY THE METHOD OF CASCADE FILTRATION

Annotation: the method of direct accounting of fungi on mycelium filters and fungal spores was modified. To account for fungi, calcofluor white (1: 10,000) is used as a dye, which is added to the soil solution and stained for 15 minutes. The length of the mycelium (μm) and the number of spores taken into account in 50 fields of view. The calculation of the length of the mycelium (m) and the number of spores (million) per 1 g of soil is carried out according to the equation: $Nb = 1.13 \times 10^7 a$, where N is the length of the mycelium and the number of spores per 1 g of soil; a is the length of the mycelium (μm) and the number of spores in one field of view (averaging is performed over all fields).

Keywords. bacteria cells, mycelium and fungal spores, abundance and biomass, cascade filtration

В настоящее время наиболее полное описание почв и процессов, протекающих в них, невозможно без понимания и учета жизнедеятельности почвенной микробиоты. Состояние последней не подлежит адекватной оценке при отсутствии данных о численности и биомассе микроорганизмов, в число которых входят грибы и бактерии, оказывающие большое влияние на почвенную среду. В последнее время учет длины грибного мицелия и численности спор производится с помощью метода люминесцентной микроскопии, имеющего ряд недостатков. Учет грибов проводится в почвенной суспензии объемом 0,04 мл, и уже априори в расчетах численности учитывается коэффициент 25. Таким образом, реальное количество объектов на препаратах отличается от такового, предсказанного теоретически.

На нашей кафедре был модифицирован метод прямого учета грибов на фильтрах. Однако, данные по длине мицелия грибов и численности спор, полученные по этому методу показали, что как длина мицелия, так и численность спор в разных типах почв невелика (Мирчинк, 1988). Из-за аликвоты в 10 мл большое количество почвы оседает на фильтре и при этом закрывает гифы и споры, приводя к их недоучету. Возникла проблема разработки метода, позволяющего учитывать длину мицелия и численность спор грибов при фильтрации меньшего объема суспензии (1 мл). Для учета грибов в качестве красителя используется калькофлуор белый (1:10000), который добавляют в почвенный раствор и окрашивают в течение 15 минут. Длину мицелия (мкм) и численность спор учитывают в 50-и полях зрения. Расчет длины мицелия (м) и численности спор (млн) на 1 г почвы проводят по уравнению: $Nb = 1.13 \times 10^7 a$, где N – длина мицелия и численность спор на 1 г почвы; a – длина мицелия (мкм) и численность спор в одном поле зрения (усреднение производится по всем полям). При определении мицелия и спор грибов суспензию фильтровали через фильтр с размером пор 1,85 мкм.

Разработанный метод учета численности бактерий по методу «каскадной» фильтрации показал, что численность бактерий, посчитанная по этому методу, и численность бактерий, посчитанная по методу люминесцентной микроскопии на стеклах примерно одинакова, а вот их биомасса различается. По методу люминесцентной микроскопии принимается размер



одной клетки бактерии в $0,1 \text{ мкм}^3$ (Кожевин и др., 1979), а метод «каскадной» фильтрации учитывает все размеры клеток, поэтому биомасса отличается от принятой ранее (метод люминесцентной микроскопии). Формула для расчета численности бактерий по методу каскадной фильтрации с учетом площади фильтра и площади поля зрения микроскопа приобретает следующий вид: $N_b = a \times 1.13 \times 10^7$, где a - численность клеток в 1 поле зрения (Полянская и др., 2015).

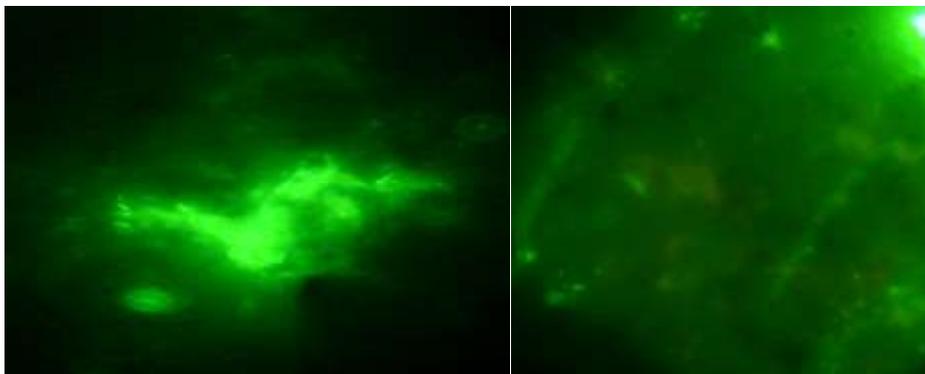
Биомассу клеток с учетом принятого в литературе сухого веса бактериальной клетки, равного $2 \times 10^{-14} \text{ г}$, вычисляли по формуле: $V_b = \frac{4}{3} \pi r^3 \times 2 \times 10^{-14} \div 0.1 \times N_b$,

где b – размер каждой фракции, r – радиус клетки (мкм), N – численность (кл/г), V – биомасса (мкг).

Средний объем одной клетки рассчитывали по формуле: $V = \frac{V_{\text{общ}}}{N_{\text{общ}} \times a}$, где $V_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ – биомасса и численность всех фракций, a – плотность одной клетки, $a = 1 \times 10^{-12} \text{ г/см}^3$, V - средний объем одной клетки ($0,1 \text{ мкм}^3$) (Кожевин и др., 1979).

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Statgraphics и Statistica. Для численности бактерий доля среднего квадратического отклонения ($\delta_n - 1$) не превышала 5–10%, для спор и мицелия грибов 15%.

При просмотре в люминесцентный микроскоп не удалось увидеть ни целостного мицелия, ни спор грибов, а только разрушенный мицелий и кучки хитина (рис.1). Стало ясно, что, по-видимому, дело в интенсивности фильтрации. С помощью ресурсов сети интернет был найден метод фильтрации при постоянной скорости, который также был назван нами методом «каскадной» фильтрации, только каскад в этом случае состоит из одного фильтра (рис.2).



а)

б)

Рис. 1. Хорошо видны кучки хитина (а) и хуже видны очертания грибных гиф (б).

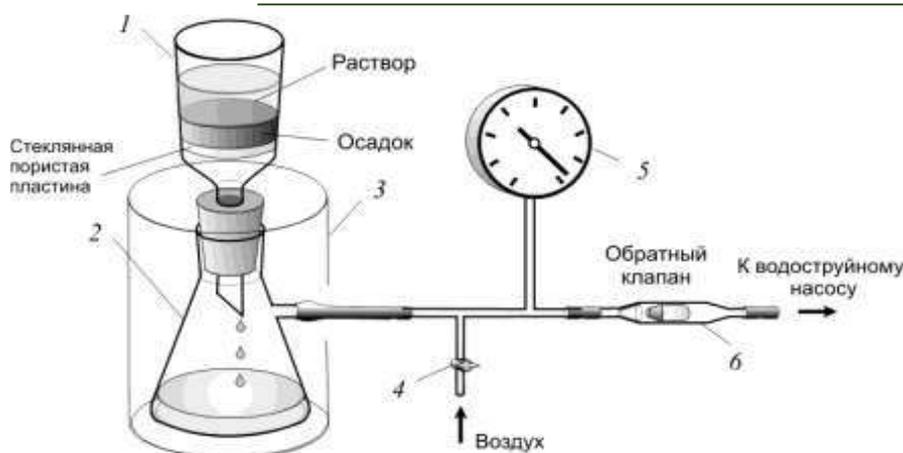
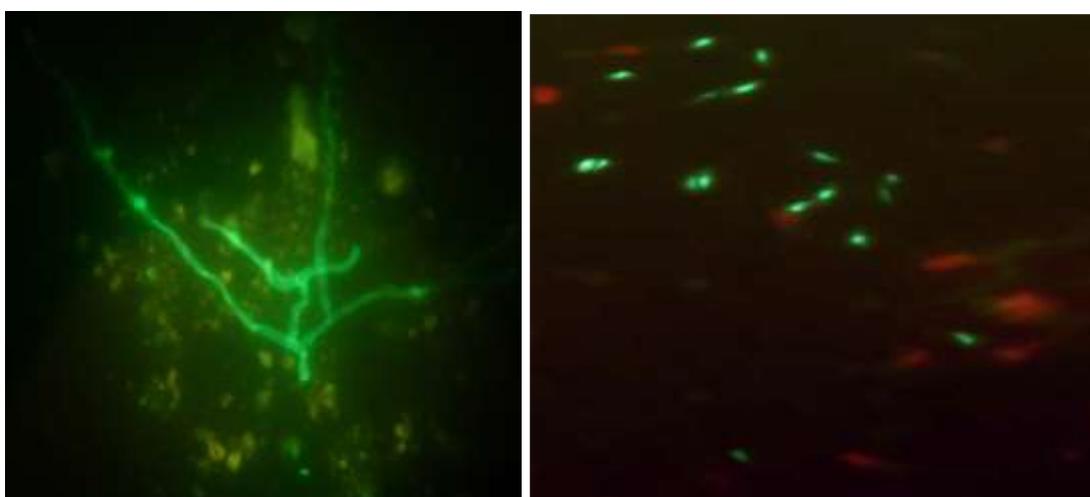


Рис.2. Фильтрация под уменьшенным давлением. 1 – Воронка, 2 – колба Бунзена, 3 – защитный кожух, 4 – кран «на воздух» (нормальное фильтрование).



а)

б)

Рис.3. Фото грибного мицелия(а) и клеток бактерий (б) в препаратах на стеклах и фильтрах (при нормальной фильтрации).

Биомасса бактерий, посчитанная по методу каскадной фильтрации составляла на 0 сутки 231,4 мкг/г почвы, а на 5-ые 436,1 мкг/г почвы, то есть в процессе инкубации бактериальная биомасса увеличилась примерно вдвое.

Было показано, что полученные данные по биомассе грибного мицелия и спор в препаратах на стеклах в образце 0 суток ниже, чем в образце 5 суток, и эти величины равны 511,5 и 1083,8 мкг/г почвы соответственно. В отношении спор наблюдается снижение биомассы с 97,9 мкг/г почвы в образце 0 суток до 85,6 мкг/г почвы на 5 сутки, такие изменения биомассы могут быть объяснены прорастанием спор.

На фильтрах биомасса грибного мицелия была выше в образце на 5-ые сутки и составила 1200 мкг/г почвы соответственно. В отношении спор наблюдалась такая же картина, как и на стеклах, что объясняется прорастанием спор с течением времени.

В работах Полянской и Звягинцева (2005) показано, что учитывая численность бактерий на стеклах (метод люминесцентной микроскопии) и размер клетки бактерий 0, 1 мкм³ (данные Кожевина с соавторами, 1979) было показано, что биомасса бактерий колебалась от 1 % до 10 %, а доля грибного мицелия составляла 99-90 % (Полянская, Звягинцев, 2005) .



Полученные нами данные показывают, что процентные соотношения биомасс грибов и бактерий, определенные по методу «каскадной» фильтрации, более точно отражают реальную картину в почвах, чем при методе люминесцентной микроскопии, на фильтрах биомасса бактерий составляет 20-30% и 70-80% составляет биомасса грибов.

Литература

- Мирчинк Т.Г. Почвенная микология: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 220 с.
- Кожевин П.А., Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Динамика развития различных микроорганизмов в почве // Микробиология. 1979. Т. 48. № 4. С. 490–494.
- Полянская Л.М., Городничев Р.Б., Звягинцев Д.Г. Размеры клеток бактерий в почвах, определяемые методом “каскадной” фильтрации // Известия РАН. Сер. Биологическая. 2013. № 1. С. 144–151.
- Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Содержание микробной биомассы как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. №6. С. 706-714



УДК 631.95

РОЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ НА ЭМИССИЮ ЗАКИСИ АЗОТА ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Балашов Е.В.

ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург, Россия

alen_rizh@mail.ru

SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND NITROUS OXIDE EMISSION FROM AGRO SODDY-PODZOLIC SOIL WITH DIFFERENT QUALITY

Rizhiya E.Y., Buchkina N.P., Mukhina I.M., Balashov E.V.

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

Annotation: The effect of soil physical properties on N₂O emission rates from agro soddy-podzolic soil with different quality was investigated. Emissions of N₂O were measured regularly over 10 years' growing seasons of 2007-2017. The importance of soil wetness and bulk density to gas emissions was mainly through its influence on soil air-filled porosity, which itself was related to gas diffusivity.

Результаты многолетних исследований влияния физических факторов среды на эмиссию закиси азота из дерново-подзолистой супесчаной почвы разной окультуренности в течение вегетационных периодов показали, что температура почвы не оказывала существенного влияния на эмиссию N₂O, в то время как увеличение влажности почвы от 17%, плотности сложения от 1,3 г/см³ и доли водонасыщенных пор в почве от 40-60% от общего количества пор, существенно ($P < 0,05$) увеличивала газообразные потери азота. Кумулятивные и внутрипочвенные потоки N₂O в слое 10-30 см существенно отличались в разные годы, что являлось последствием существенных различий в распределении осадков по месяцам вегетационного сезона и были преимущественно выше из высоко окультуренной почвы, чем из средне окультуренной почвы, и направлены преимущественно вверх.

Введение

Почвы выполняют глобальную экологическую функцию регулятора состава и состояния атмосферы. Аэрация почвы и газообмен с атмосферой тесно связаны с процессами эмиссии газов (Смагин, 2005). Измерение прямых эмиссий парниковых газов из почв различных регионов России является одним из ключевых шагов при оценке вклада сельского хозяйства страны в общий бюджет парниковых газов.

В экономике сельскохозяйственного сектора любой страны среди парниковых газов особое внимание уделяется эмиссии закиси азота (N₂O), вклад почвенного покрова в эмиссию данного парникового газа составляет более 80% N₂O от всех антропогенных источников (Beauchamp, 1997). N₂O сохраняется в атмосфере в течение длительного периода жизни, исчисляющегося сотней лет, газ способен аккумулировать энергию инфракрасного излучения в 310 раз эффективнее, чем CO₂ (Buchkina et al., 2010).

Интенсивность формирования N₂O в почве определяется физическим плодородием почв, продуктивностью растительных культур и зависит от комбинации множества факторов, таких как тип почв, гидротермические условия окружающей среды, вид и рост надземной и корневой массы, особенность трансформации органического материала микроорганизмами и т.д. (Mukherjee and Lal, 2013). Различные физические факторы почвенной среды, среди которых наиболее заметное действие проявляют влажность, температура, структура,



плотность сложения и пористость, в совокупности с агротехническими мероприятиями, применяемыми для выращивания различных культур в течение вегетационных периодов, могут ускорять или подавлять жизнедеятельность почвенных микробов, приводя к повышению или снижению кумулятивных потоков N_2O .

На основе мониторинговых исследований с использованием напочвенных экспозиционных камер и силиконовых трубок, изучены количественные закономерности эмиссии N_2O из дерново-подзолистых почв разной окультуренности с выявлением роли физических факторов в прямую эмиссию данного газа из почвы. Под окультуренностью почв понимается степень благоприятных изменений их свойств под влиянием сельскохозяйственных мероприятий с целью регулирования функции продуктивности и других экологических функций почв для достижения оптимальных и устойчивых условий для возделывания культурных растений на сельскохозяйственных участках.

Объекты и методы

Объектами исследований служили дерново-подзолистые супесчаные почвы агрофизического стационара Меньковского филиала Агрофизического НИИ. На данном стационаре с 2003 года искусственно разработаны участки с разной степенью окультуренности при внесении больших доз органических удобрений (80 и 160 т/га навоза в 2003-2005 гг и 2009 году, соответственно в варианты с хорошей и высокой степенью окультуренности). Описание агрофизического стационара и схем эксперимента подробно рассмотрено в публикациях (Балашов, 2012; Оленченко 2012). Изучались пахотные горизонты на участках со средней и высокой окультуренностью, в вариантах с максимальным количеством внесения минеральных удобрений и в контроле.

Исследования физических параметров почв и эмиссии закиси азота из почв проводились в течение вегетационных периодов (с мая по сентябрь) с 2007 по 2017 годы, в динамике. Периодичность отбора образцов почвенного воздуха - 1 раз в неделю, с учетом возможных больших потерь азота в короткие периоды времени - после интенсивных осадков, внесения удобрений или дополнительной обработки почвы, предусмотренной выращиванием культуры. Отбор проб воздуха проводился в стеклянные флаконы с помощью 60-мл шприца через трехходовой кран, смонтированный в центр каждой камеры или в трубки, выходящей на поверхность почвы, повторность 3-кратная. Концентрация N_2O в образцах определялось с помощью газового хроматографа, оснащенного детектором электронного захвата.

В исследовании физических свойств почв применяли стандартные и общепринятые методы изучения агрофизики (Растворова, 1986). Метеорологические данные (температура воздуха, осадки, рис. 1) предоставлялись Меньковской метеостанцией, расположенной в 200 метрах от агрофизического стационара.

Вегетационные периоды исследования характеризовались различными погодными условиями. Средняя температура воздуха варьировала от 11 до 14 градусов (с максимальными показаниями в июле), и средняя сумма осадков - от 320 (сухой вегетационный период) до 1050 (влажный вегетационный период).

Температуру почв в течение вегетационного сезона фиксировали с помощью автоматических датчиков DS1920, установленных на глубине 10-15, 25-30 и 45-50 см. Влажность почв и плотность сложения регулярно измеряли на тех же глубинах термостатно-весовым методом с помощью тонкостенный стальных цилиндров. Общую порозность (% от объема) вычисляли по показателям плотности почвы и плотности твердой фазы. Для статистической обработки данных использовалась Statistica 7.0.

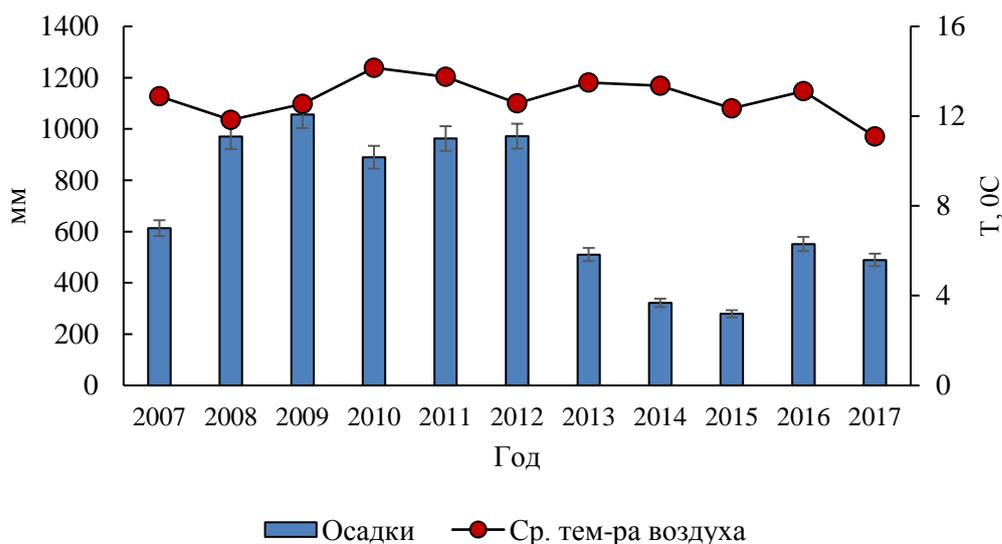


Рис.1. Средняя температура воздуха и среднее количество осадков за вегетационные периоды (май-сентябрь) 2007-2017 гг. на агрофизическом стационаре Меньковского филиала ФГБНУ АФИ

Результаты и обсуждение

Кумулятивные потоки N_2O существенно отличались в разные годы, что являлось последствием существенных различий в распределении осадков по месяцам вегетационного сезона и были преимущественно выше из высоко окультуренной почвы, чем из средне окультуренной почвы.

В течение изучаемых вегетационных периодов влажность высоко окультуренной почвы на глубине 5-10 см изменялась от 6 до 25 % (от массы) и была в среднем на 1,5-5% выше ($P < 0,05$), чем влажность средне окультуренной почвы. На глубине 25-30 см влажность почв изменялась от 4-6 до 19-22 %, а на глубине 45-50 см – от 3-5 до 10-13 %, при этом различия во влажности между слабо и хорошо окультуренной почвой были недостоверными и достоверно зависели ($P < 0,05$) от количества осадков и температуры воздуха.

Временной ход температуры почвы в течение вегетационных периодов на разных глубинах соответствовал ходу температуры воздуха с уменьшением амплитуды суточных колебаний и запаздыванием тепловой волны с увеличением глубины, и варьировала от 9 до 19 °С в верхних слоях почвы с недостоверным снижением вниз по профилю почв.

Плотность сложения высоко окультуренной почвы на глубине 5-10 и 25-30 см изменялась в среднем от 1,1 до 1,3 г/см³ и была на 0,1–0,15 г см-3 ниже, чем плотность сложения слабо окультуренной почвы, однако эти различия также были статистически недостоверными. Исследуемые почвы не различались по плотности сложения на глубине 45-50 см.

Порозность аэрации средне и высоко окультуренной почвы в слоях 5-10 см и 25-30 см в среднем изменялась от 45% до 88% и от 44% до 85%. Поскольку средне и высоко окультуренная почва обладала высокой порозностью аэрации, то нитрификация была основным микробиологическим процессом формирования N_2O в почве.

Установлено, что в среднем за период наблюдений концентрации (мг кг⁻¹ почвы) минеральных форм азота ($NO_3^-+NH_4^+$) составляли в средне окультуренной почве на глубине 10 см и 30 см: 4,4-26,1 и 3,5-18,9 (вариант без удобрений), 4,1-48,1 и 3,7-29,0 (вариант с удобрением), и в высоко окультуренной почве на глубине 10 см и 30 см: 10,4-21,8 и 8,9-24,5 (вариант без удобрений), 9,6-39,0 и 8,1-34,8 (вариант с удобрением). Эти результаты



показали, что, во-первых, содержание минеральных форм азота было недостоверно выше в высоко окультуренной почве и, во-вторых, внесение азотных удобрений способствовало преимущественно недостоверному увеличению содержания минеральных форм азота.

Результаты 10-летнего периода наблюдений показали, что кумулятивные потоки N_2O из почв изменялись в пределах: 55-140 г N_2O /га (средне окультуренная почва без удобрений), 65-160 г N_2O /га (средне окультуренная почва с удобрениями), 50-190 г N_2O /га (высоко окультуренная почва без удобрений) и 120-320 г N_2O /га (высоко окультуренная почва с удобрениями).

За время исследований было выявлено, что эмиссия N_2O из агроземов никогда не превышала 5 мг N_2O -N/га в день, если почва содержала менее 10 мг доступного минерального азота на 1 кг почвы. Влажность почвы оказывала существенное влияние на эмиссию N_2O , если почва была влажнее, чем на 17% и содержала более 10 мг доступного азота на кг почвы. Было установлено, что в течение вегетационного сезона концентрация N_2O в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы: достоверно ($P < 0,05$) возрастала с глубиной, существенно ($P < 0,001$) зависела от увеличения влажности и плотности сложения почвы, но не зависела от температуры почвы.

В среднем за 10-летний период наблюдений концентрации (ppb) N_2O составляли в средне окультуренной почве на глубине 10 см и 30 см: 316-729 и 330-688 (вариант без удобрений), 342-459 и 302-613 (вариант с удобрением), и в высоко окультуренной почве на глубине 10 см и 30 см: 341-511 и 393-515 (вариант без удобрений), 394-594 и 420-607 (вариант с удобрением). Положительный вклад минеральных форм азота в формирование N_2O в высоко окультуренной почве объясняется, возможно, большей активностью нитрифицирующих микроорганизмов. Коэффициенты корреляции между концентрациями N_2O и минеральных форм азота на глубине 10 см и 30 см главным образом были положительными ($r=0,06-0,93$) и преимущественно недостоверными согласно уровнями значимости ($p > 0,05$).

Установлено, что внутрипочвенные потоки N_2O в слое 10-30 см высоко окультуренной почвы были выше, чем средне окультуренной, и направлены преимущественно вверх, что, возможно, объясняется более высокой непрерывностью пор (Głab and Kulig, 2008). В среднем за 10-летний период наблюдений внутрипочвенные потоки N_2O (мг N_2O м⁻² сут⁻¹) изменялись в 10-30-см слое средне окультуренной почвы: от -2,44 до 1,36 (вариант без удобрений) и от -5,48 до 6,60 (вариант с удобрением), и высоко окультуренной почвы: -5,44 до 9,99 (вариант без удобрений) и от 0,44 до 7,01 (вариант с удобрением). Коэффициенты корреляции между прямыми эмиссиями N_2O из почвы и её потоками в 20-см слоях на глубине 10-30 см средне и высоко окультуренной почвы были недостоверно либо положительными (от $r=0,21$ до $r=0,66$), либо отрицательными (от $r=-0,01$ до $r=-0,85$).

Таким образом, результаты исследований показали, что представленный подход к оценке качества почв является целесообразным, но требует большего объёма результатов сопряжённого анализа взаимосвязей между прямыми эмиссиями N_2O из почв, её внутрипочвенными концентрациями и потоками, и содержанием физических показателей в слоях от 5-10 см до 25-30 см.



Заклучение

Влажность, температура, структура, плотность сложения, в совокупности с агротехническими мероприятиями, применяемыми для выращивания различных культур в течение вегетационных периодов на дерново-подзолистой супесчаной почве оказывали существенное влияние на кумулятивные потоки N_2O . Концентрация N_2O в профиле дерново-подзолистой супесчаной почвы достоверно ($P < 0,05$) возрастала с глубиной, существенно ($P < 0,001$) зависела от увеличения влажности и плотности сложения почвы, но не зависела от температуры почвы. Кумулятивные потоки N_2O существенно отличались в разные годы, что являлось последствием существенных различий в распределении осадков по месяцам вегетационного сезона и были преимущественно выше из высоко окультуренной почвы, чем из средне окультуренной почвы.

Литература

- Балашов Е.В. Современный научно-методологический подход к проведению мониторинга качества и устойчивости сельскохозяйственных почв. *Агрофизика*. 2012. №3(7): 10-20.
- Оленченко Е.А., Рижиа Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре. *Агрофизика*. 2012. №4(8): 8-18.
- Растворова О.В. Физика почв. Практическое руководство. Изд-во ЛГУ, Ленинград, 1983. 195 с.
- Смагин А.В. Газовая фаза почв. Изд-во Моск Ун-та, Москва, 2005. 301 с.
- Beauchamp E.G. (1997) Nitrous oxide emission from agricultural soils. *Can. J. Soil, Sci.* 77: 113-123. <https://doi.org/10.4141/S96-101>
- Buchkina N.P., Balashov E.V., Rizhiya E.Y., Smith K.A. (2010) Nitrous oxide emissions from a light-textured arable soil of North-Western Russia: effects of crops, fertilizers, manures and climate parameters. *Nutr Cycling Agroecosyst.* 87: 429–442. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9349-5>
- Głab T., Kulig B. (2008) Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research.* V. 99(2): 169-178. DOI: 10.1016/j.still.2008.02.004
- Mukherjee A., Lal R. (2013) Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy* 3:313–339. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy3020313>



УДК 57.044, 54.01, 547.992

УЧАСТИЕ ИОНОВ КАДМИЯ(II) И МЕДИ(II) В МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ В РАСТВОРАХ

Тихонов В.В.¹, Дроздова О.Ю.², Карпухин М.М.¹, Демин В.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
vvt1985@gmail.com

²Геологический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

PARTICIPATION OF CADMIUM (II) AND COPPER (II) IONS IN INTERMOLECULAR FORCES OF HUMIC
ACIDS IN SOLUTIONS

Tikhonov V., Drozdova O., Karpukhin M., Demin V.
Lomonosov Moscow State University

Annotation: Using membrane ultrafiltration and HPLC methods, it was shown that copper ions, unlike cadmium ions, form supramolecular associates with HA (> 10 kDa)

Введение

Гуминовые кислоты (ГК) играют важнейшую роль в транспорте элементов в почвах и природных водах. Выступая в качестве макролигандов, молекулы ГК не только меняют параметры миграции ионов металлов в окружающей среде, но и воздействуют на механизмы транспорта ионов в живые клетки. Первоначально особое внимание уделялось исследованию формированию прочных комплексов ионов металлов с ГК при участии донорно-акцепторных и ионных взаимодействий (Schnitzer, 1978; Stevenson, 1982; Orlov et al., 1989). В дальнейшем внимание исследователей сфокусировалось на слабых межмолекулярных взаимодействиях между молекулами гуминовых кислот в растворах, приводящих к образованию межмолекулярных ассоциатов (комплексов, супрамолекул) (Wershaw, 1986; Piccolo, 2001; Kleber, Johnson, 2010). Ионы металлов могут принимать участие в образовании подобных ассоциатов, построенных за счет слабых взаимодействий (водородные связи, гидрофобные взаимодействия), однако это явление остается малоизученным. Целью работы являлось изучение роли ионов Cd(II) и Cu(II) в молекулярной и надмолекулярной организации ГК в растворе.

Объекты и методы

В работе использовалась ГК фирмы Aldrich (cas № 1415-93-6), растворенные в 0,01 М NaOH и доведенные до pH 6 с помощью 1 М HCl. К раствору ГК (100 мг/л) добавляли растворы CdCl₂ или CuCl₂ до концентрации 50 мкМ и инкубировали в темноте при 20 °С в течение 12 часов. Разделение ГК на фракции проводили 2 методами – ультрафильтрации и эксклюзионной хроматографии. Для ультрафильтрации ГК использовали фильтры 10 кДа (Millipore) и установку фирмы Amicon. Эксклюзионная хроматография (SEC) выполнялась методом ВЭЖХ (Agilent 1100 с диодно-матричным детектором; колонка Ultropac G2000SW, LKB; элюент – 0,1М Na-фосфатный буфер (pH 7) с 0,1% SDS). Определение содержания Cd и Cu в пробах проводили на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 5110 ICP-OES. Определение органического С в пробах определяли на жидкостном элементном анализаторе (LiquiTOC trace, Elementar). Для оценки доли ионов металлов, связанных с ГК, использовались данные по содержанию COOH групп в ГК фирмы Aldrich, взятые из литературы (Reiller et al., 2002).



Результаты и обсуждение

Введение ионов металлов в раствор ГК не вызывает, по данным SEC ВЭЖХ заметных изменений в молекулярно-массовом распределении ГК (табл.1, рис. 1). В тоже время, результаты ультрафильтрации (табл. 2) показывают, что введение в раствор, содержащий ГК ионов Cu (но не Cd) вызывает заметное увеличение доли фракции >10 кДа.

Таблица 1. Значение средневесовых молекулярных масс ГК

| Вариант | Исходная ГК | ГК >10 кДа | ГК <10 кДа |
|---------|-------------|------------|------------|
| ГК | 29300 | 30400 | 500 |
| ГК+Cd | 29700 | 31900 | 650 |
| ГК+Cu | 30200 | 31600 | 730 |

Таблица 2. Концентрация общего органического углерода, карбоксильных групп и металлов до и после фракционирования

| Вариант | C, мг/л | Металл, мкМ | COOH-группы, мкМ | Металл/ COOH |
|----------------|---------|-------------|------------------|--------------|
| ГК | 37 | - | 320 | - |
| ГК >10 кДа | 24 | - | 210 | - |
| ГК < 10 кДа | 12 | - | 100 | - |
| ГК+Cu | 37 | 50 | 320 | - |
| ГК+Cu >10 кДа | 26 | 38 | 230 | 0,17 |
| ГК+Cu < 10 кДа | 9 | 7 | 80 | 0,09 |
| ГК+Cd | 37 | 50 | 320 | - |
| ГК+Cd >10 кДа | 20 | 26 | 170 | 0,15 |
| ГК+Cd < 10 кДа | 10 | 19 | 90 | 0,21 |

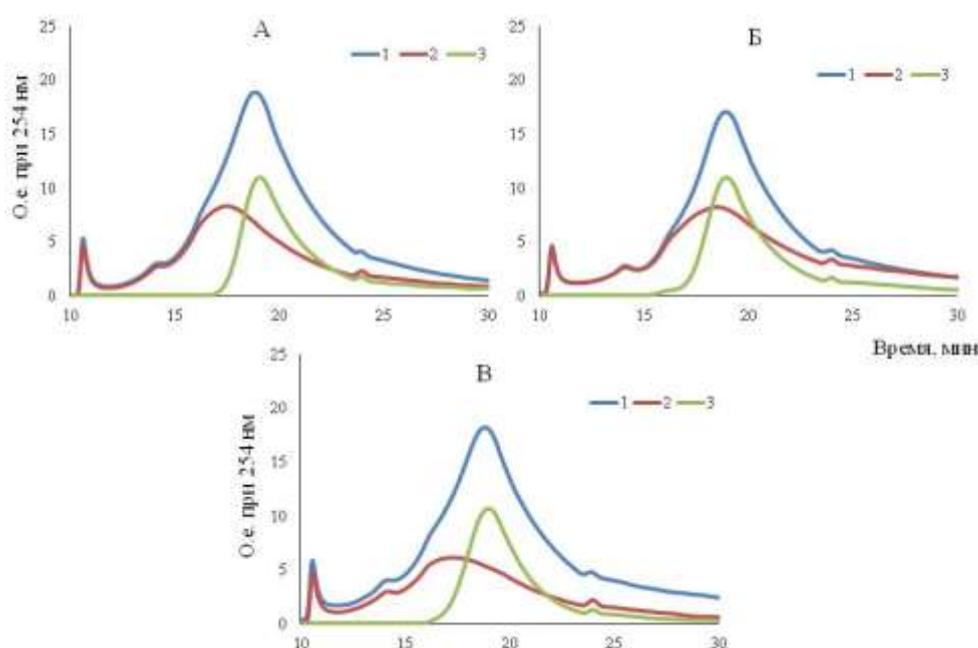


Рис.1. Хроматограмма нефракционированной ГК (1), фракции >10 кДа (2) и фракции <10 кДа (3). А – ГК без металлов, Б – ГК+ Cd, В – ГК+Cu



При использовании метода ультрафильтрации разделение происходит на уровне как индивидуальных молекул ГК, так и надмолекулярных ассоциатов. При разделении методом SEC используется элюент на основе фосфатного буфера (возможное конкурентное связывание ионов Cd и Cu в растворе) и сильного ионного детергента (SDS), блокирующего водородные связи и гидрофобные взаимодействия. Поэтому, даже если в растворе образуются прочные бинарные комплексы Cu-ГК (и в меньшей степени Cd-ГК), SEC ВЭЖХ не позволят выявить достоверное увеличение молекулярных масс ГК. Низкая степень насыщения карбоксильных групп ионами металлов, достигнутая в эксперименте (табл. 2), также снижает вероятность появления заметных изменений в молекулярно-массовом распределении ГК. В то же время, существование надмолекулярных структур, образованных за счет слабых кулоновских взаимодействий (например, $\text{ГК}_1\text{-Cu-ГК}_2$) может быть зарегистрирована методом ультрафильтрации, но не методом SEC с использованием «агрессивного» элюента. Образование надмолекулярных комплексов за счет слабых кулоновских взаимодействий регистрировалось при введении в растворы ГК (Aldrich) ионов железа (Begum et al., 2018) и кобальта (Tanaka, 2012).

В ранних работах (Stevenson, 1982; Orlov et al., 1989) образование надмолекулярных ассоциатов типа $\text{ГК}_1\text{-Me-ГК}_2$ регистрировалось методом гель-фильтрации с использованием «мягких» элюентов (вода, разбавленная щелочь), однако разделение этих ассоциатов по прочности связывания ионов металла в этих условиях провести невозможно. В то же время, сочетание методов ультрафильтрации и SEC ВЭЖХ позволяет не только обнаруживать в системах, содержащих ионы металлов и гуминовые кислоты надмолекулярные структуры, образованные за счет слабых межмолекулярных взаимодействий, но и отделять их от более прочных комплексов ионов металлов с ГК.

Можно предположить, что начальным этапом формирования лабильных надмолекулярных комплексов является образование бинарных комплексов типа Me-ГК, в которых принимают участие карбоксильные группы макролиганда. После частичной компенсации отрицательного заряда на макролиганде увеличивается вероятность его взаимодействия с другим макролигандом, находящимся в растворе, что, в свою очередь, приводит к образованию структур типа Me-ГК \cdots ГК или Me-ГК \cdots ГК-Me. Аналогичная ситуация возникает при присоединении иона металла Me к уже существующей в растворе надмолекулярной структуре ГК \cdots ГК.

На рисунке 2 представлена схема подобного взаимодействия. В качестве макролиганда использована структура, идентифицированная в составе стандарта фульвокислоты IHSS (Leenheer, 2007). Величина pK для двух смежных COOH -групп меньше 2, поэтому они будут депротонированы при величинах pH , характерных для почв и природных вод. Еще одна алифатическая COOH -группа имеет pK 4.8-5.0 и, следовательно, будет частично протонирована при pH меньше 6. На первом этапе происходит связывание иона металла с образованием бидентатного 5-членного цикла. Вероятность протекания этой реакции пропорциональна устойчивости образующегося хелатного комплекса, как правило, комплексы с участием Cu(II) более прочные, чем с Cd(II) (Stevenson, 1982), поэтому в экспериментах, описанных выше наблюдалось влияние ионов меди(II) на молекулярно-массовое распределение частиц в растворе ГК. Дальнейшее взаимодействие протекает с участием протонированной COOH -группы, которая образует димер с аналогичной функциональной группой другого макролиганда. Другие типы слабых взаимодействий (гидрофобные, с участием мостиков H_2O и др.) также могут иметь место (Leenheer, 2007). Обобщенная электронная плотность бензольных колец ГК также может образовывать



дополнительные водородные связи между двумя молекулами путем стекингвой связи (рис.3).

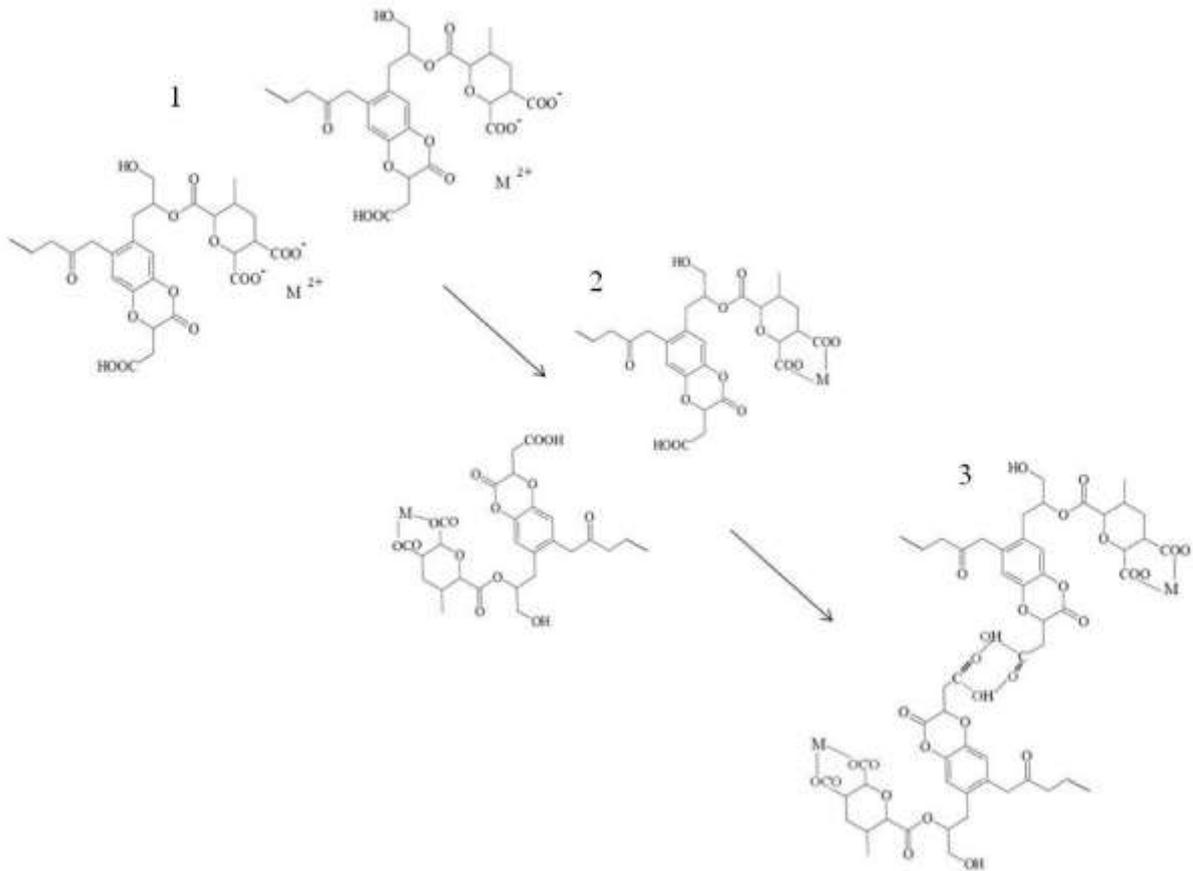


Рис.2. Образование межмолекулярных комплексов гуминовых кислот с металлами (водородные связи)

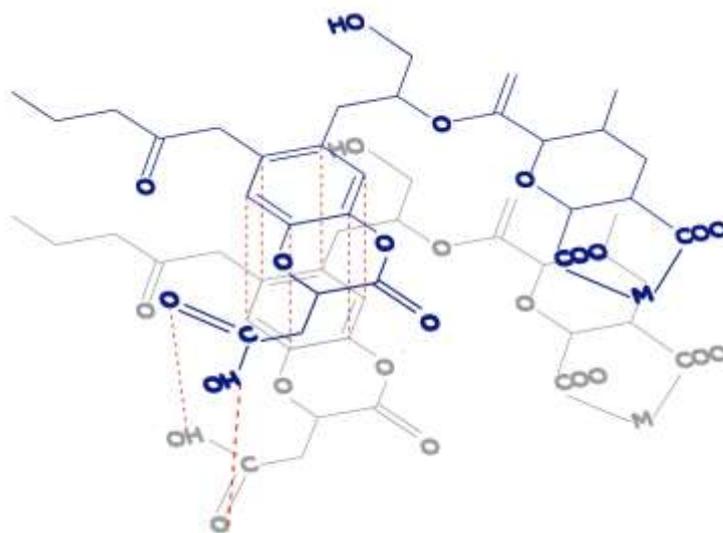


Рис.3. Образование межмолекулярных комплексов гуминовых кислот с металлами (водородные связи и пи стекинг)



Эти надмолекулярные структуры, образованные органическими молекулами и ионами металлов более чувствительными к физико-химическим параметрам окружающей среды по сравнению с комплексами Me-ГК или $ГК_1$ -Me- $ГК_2$, образованными за счет донорно-акцепторных связей или сильных кулоновских взаимодействий. Изучение всего спектра частиц, образующихся в растворах содержащих ГК и ионы металлов, необходимо как при исследовании миграции металлов в экосистемах, так и для оценки биодоступности и токсичности металлов для живых организмов в почвах и поверхностных водах.

Благодарности

Работа осуществлена при поддержке РНФ проект № 18-74-00088.

Литература

- Begum Z.A., Ismail M.M. Rahman I.M.M., Tate Y., Ichijo T., Hasegawa H. Binding of proton and iron to lignite humic acid size-fractions in aqueous matrix // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. V.254. P. 241–247.
- Kleber M., Johnson M.G. Advances in understanding the molecular structure of soil organic matter: implications for interactions in the environment. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, 2010, V. 106. Elsevier Academic Press Inc, 525 B Street, Suite 1900, San Diego, CA 92101-4495 USA, P. 77 - 142.
- Leenheer J.A. Progression from model structures to molecular structures of natural organic matter components // *Annals of Environmental Science*. 2007. V.1. P.57-68.
- Orlov D.S., Minko O.I., Demin V.V., Salnikov V.G., Izmailova N.B., Milanovskii E.Y. On the participation of metals in the formation of molecular-mass organization of soil humus matter // *Doklady Akademii Nauk SSSR*.1989. V.305. P.1228-1231.
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances // *Soil Sci*. 2001. V. 166. P.810–832.
- Reiller P., Moulin V., Casanova F., Dautel C. Retention behaviour of humic substances onto mineral surfaces and consequences upon thorium (IV) mobility: case of iron oxides//*Applied Geochemistry*. 2002. V. 17. P.1551–1562.
- Schnitzer M. Humic substances: Chemistry and reactions. In “Soil Organic Matter” M. Schnitzer and S. U. Khan, Eds., 1978, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. *Developments in Soil Science* 8, p. 1–64.
- Stevenson F.J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. 1982, John Wiley & Sons, New York, 443 pp.
- Tanaka T. Functional groups and reactivity of size-fractionated Aldrich humic acid // *Thermochimica Acta*. 2012. V. 532. P. 60– 64.
- Wershaw, R. L. A new model for humic materials and their interactions with hydrophobic organic chemicals in soil-water or sediment-water systems. // *J. Contam. Hydrol*. 1986. V.1. P.29–45.



УДК 574.4

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЭМИССИЮ CO₂ ИЗ СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ: РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Хорошаев Д.А.^{1,2}, Курганова И.Н.¹, Лопес де Гереню В.О.¹, Жмурич В.А.¹

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Российская Федерация

² Пушкинский государственный естественно-научный институт, Пушкино, Российская Федерация
d.khoroshaev@tutanota.com

NAME IN ENGLISH LANGUAGE

Khoroshaev D.A.^{1,2}, Kurganova I.N.¹, Lopes de Gerenuy V.O.¹, Zhmurin V.A.¹

¹ Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Sciences RAS, Pushchino, Russian Federation

² Pushchino State Institute of Natural Sciences, Pushchino, Russian Federation

Annotation: The full-scale experiment to manipulate a snowpack depth in temperate grassy ecosystems was carried out. The reducing of snow cover lead to an increase of soil frost penetration and decline of soil CO₂ efflux. Deep of snowpack is important factor of summary CO₂ flux from soil for winter period in seasonally snow-covered ecosystems.

Введение

Зимняя эмиссия CO₂ из почв является важным компонентом углеродного баланса в экосистемах бореальной зоны, где она может составлять 5-40% от годовых почвенных потоков CO₂ (Zamolodchikov and Karelin, 2001; Kurganova et. al, 2003; Wang et. al., 2010). Предполагается, что от 10 до 50% углерода, поглощённого экосистемами за вегетационный сезон, выделяется зимой в процессе микробного разложения (Blankinship and Hart, 2012). Однако, предпринимаемые в настоящее время усилия по оценке и моделированию углеродного цикла в северных экосистемах сильно затруднены из-за плохого понимания факторов, контролирующих основные биохимические процессы в холодное время года. Ситуация осложняется проявлением отчетливых сезонных климатических трендов, которые наблюдаются последние десятилетия как на территории России, так и за ее пределами. Для юга Московской области изменения зимнего климата выражаются в виде сокращения продолжительности залегания снежного покрова и снижения его максимальной высоты на фоне общего потепления (Курганова и др., 2017).

Наблюдения за зимней эмиссией CO₂ из почв весьма немногочисленны (Reinmann and Templer, 2018; Kurganova et. al, 2016; Brooks et al., 2011). Считается, что в результате зимнего потепления, снижения глубины и продолжительности промерзания почвы доля зимней эмиссии в годовых почвенных потоках CO₂ будет возрастать (Kurganova et. al, 2016; Brooks et al., 2011). В рамках оценки годового баланса углерода в экосистемах, эти тенденции, вероятно, могут существенно изменить результирующую составляющую и обеспечить перевод экосистемы из категории стока углерода в его источник.

Цель данного исследования состояла в оценке влияния высоты снежного покрова на зимнюю эмиссию CO₂ почвами луговых экосистем умеренной зоны в натурном модельном эксперименте.



Объекты и методы

Климат и почвы в районе исследований

Имитационный эксперимент по моделированию разной высоты снежного покрова и его влиянию на эмиссию CO_2 из почв был заложен на экспериментальных площадках Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино, Московская область). Климат региона умеренно-континентальный. По данным станции фонового мониторинга (п. Данки, Московская область, $54^{\circ}55'$ с.ш., $37^{\circ}34'$ в.д.) среднегодовая температура воздуха за период 1981–2010 гг., который принят за современную климатическую норму составила 5.2 ± 0.2 °С, а среднегодовая сумма осадков — 659 ± 17 мм. В холодный период, который охватывает отрезок с ноября по март выпадает треть годовых осадков. Самый холодный месяц — февраль, средняя многолетняя температурой воздуха которого составляет -7.5 ± 4.3 °С. Средняя продолжительность устойчивого снежного покрова для данного региона с 1973 по 2016 гг. существенно варьирует, составляя в среднем 130 ± 20 дней, а максимальная высота снежного покрова — 52 ± 13 см (Курганова и др., 2017).

Почва экспериментального участка – серая лесная среднесуглинистая (*Eutric Retisols*) с соотношением фракций песок:ил:глина = 1:1.8:2. Содержание общего углерода составляет 13.4 ± 0.9 г С/кг почвы (CHNS анализатор, Лесо, США). Пространственная вариабельность почвенных свойств в пределах экспериментального участка невысокая (Kurganova et al., 2016).

Описание эксперимента

Изучение влияния высоты снежного покрова на эмиссию CO_2 из почв проводили в зимой 2015–16 гг. Имитировали три варианта, различающихся по высоте снежного покрова:

(1) — отсутствие снежного покрова (*без снега*, БС), что обеспечивалось удалением выпавшего снега в течение 1–2 дней после снегопада;

(2) — дополнительное утепление (ДУ) теплоизолирующим материалом (три слоя синтепона 200 г/м³, чередующихся с нетканым укрывным материалом), который укладывали накануне первых заморозков. Общая высота имитирующего снег покрытия — 15 см.

(3) — контроль, с естественным уровнем снежного покрова (К).

Экспериментальный участок был разбит на 12 делянок площадью 4 м², половина из которых была покрыта луговой растительностью, а на других 6 площадках поддерживался чистый пар. Расположение вариантов опыта в пространстве последовательное, а делянок внутри каждого варианта — чередующееся.

Определение почвенного дыхания

Определение эмиссии CO_2 из почв проводили камерным методом. До начала первых заморозков на каждой делянке устанавливали по 3 полихлорвиниловые (ПВХ) трубы диаметром 10 см и высотой 40 см, которые заглубляли в почву на глубину 10 см. На вариантах, предполагающих наличие снежного покрова, высоту труб увеличивали в течение зимы по мере роста высоты снега. Перед началом каждого замера трубы накрывали крышками, после чего в течение 14 минут через равные промежутки времени медицинскими шприцами (30 см³) отбирали 3 газовые пробы, в которых в тот же день в лаборатории определяли концентрацию CO_2 на инфракрасном газовом анализаторе (LI-COR 820).

Определение температуры почвы

Температуру почв контролировали каждые 4 часа при помощи автоматических температурных логгеров (iButton, США), которые устанавливали в центре каждой делянки на глубине 1 , 5 , 10 и 20 см.



Результаты

Погодные условия

Зима 2015–16 гг. была аномально теплой. По данным станции фонового мониторинга (п. Данки, Московская область) средние температуры декабря и февраля составили -0.5 и -0.9 °С, что было соответственно на 5.5 и 6.6 °С выше климатической нормы (период 1981–2010 гг.). В тоже время температура января была на 3.4 °С ниже климатической нормы и составила -10.7 °С. Морозный период со среднесуточными температурами воздуха < 0 °С на экспериментальном участке продолжался с 15 ноября 2015 по 25 марта 2016 (131 день). В течение этого времени было зафиксировано 6 оттепелей со среднесуточной температурой воздуха > 0 °С в течение 4 – 11 дней. Устойчивый снежный покров образовался с 7 января и продолжался до 1 апреля (85 дней). Таким образом, в течение полутора месяцев после начала морозного периода почва не была покрыта снегом.

Влияние снежного покрова на температуру почвы

В течение морозного периода до образования устойчивого снежного покрова ход температуры почвы находился в соответствии с погодными условиями, что подтверждает тесная корреляция между температурой воздуха и почвы на глубине 5 см (Табл. 1). Условия на поверхности в это время (отсутствие или наличие растительного покрова) определяли степень охлаждения почв в дни с сильными отрицательными температурами, и таким образом влияли на скорость и глубину промерзания почв (Рис. 1).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между среднесуточными температурами воздуха и почвы на глубине 5 см в отсутствие снежного покрова и при высоте снега 20-40 см.

| Вариант | ДУ | | К | | БС | |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| | Луг | Пар | Луг | Пар | Луг | Пар |
| Без снежного покрова (1–31 декабря 2015 г.) | 0.82* | 0.80* | 0.81* | 0.87* | 0.81* | 0.86* |
| Наличие снежного покрова (13–31 января 2016 г.) | 0.03 ^{ns} | -0.07 ^{ns} | 0.23 ^{ns} | 0.43 ^{ns} | 0.83* | 0.84* |

Связь значима при * $p < 0.01$; ** $p = 0.01 - 0.05$; ns = связь не значима.

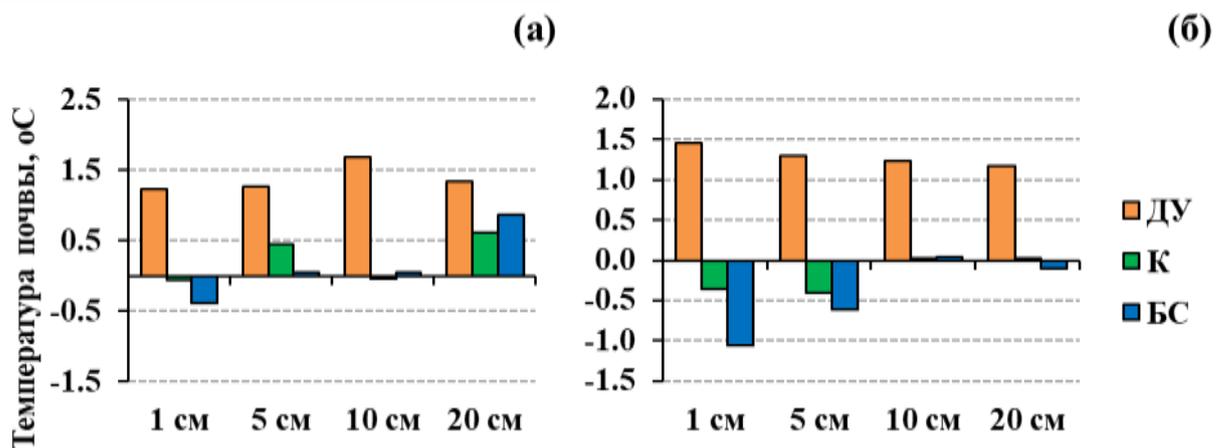


Рис.5. Средняя температура почвы на разных глубинах за морозный период (15.11.2015 – 25.03.2016) на луговых (а) и паровых (б) делянках по вариантам: (ДУ) – дополнительное утепление, (К) – контроль с естественным снежным покровом и (БС) – без снежного покрова

Из-за частых оттепелей сильного промерзания почв в зимний период 2015-2016 гг. мы не наблюдали. Средняя температура почвы в слое 0-5 см за морозный период на варианте БС была лишь немного ниже по сравнению с вариантом К (Рис. 1). Теплоизолирующий материал,



используемый в варианте ДУ предотвратил промерзание почвы и существенно увеличил среднюю за морозный период температуру почвы (Рис. 1).

Потоки CO_2 из почв

В период с 26 ноября 2015 по конец марта 2016 гг. (125 дней) суммарные потоки CO_2 с луга на варианте без промерзания почвы составили 394 г С/м^2 , значительно превосходя суммарные потоки с других вариантов: 155 г С/м^2 (К) и 56 г С/м^2 (БС). Величина последних последние была близка к суммарным зимним потокам, регистрируемым на протяжении ряда лет в луговых экосистемах региона за 1998-2003 гг. и составляющим $58 - 157 \text{ г С м}^{-2}$ (Kurganova et al., 2004; Kudayarov and Kurganova, 2005). Суммарные потоки CO_2 с парующих площадок за этот период пара были в 2-3.5 раза меньше, чем с луговых и составили 139, 43 и 29 г С/м^2 с вариантов ДУ, К и БС, соответственно.

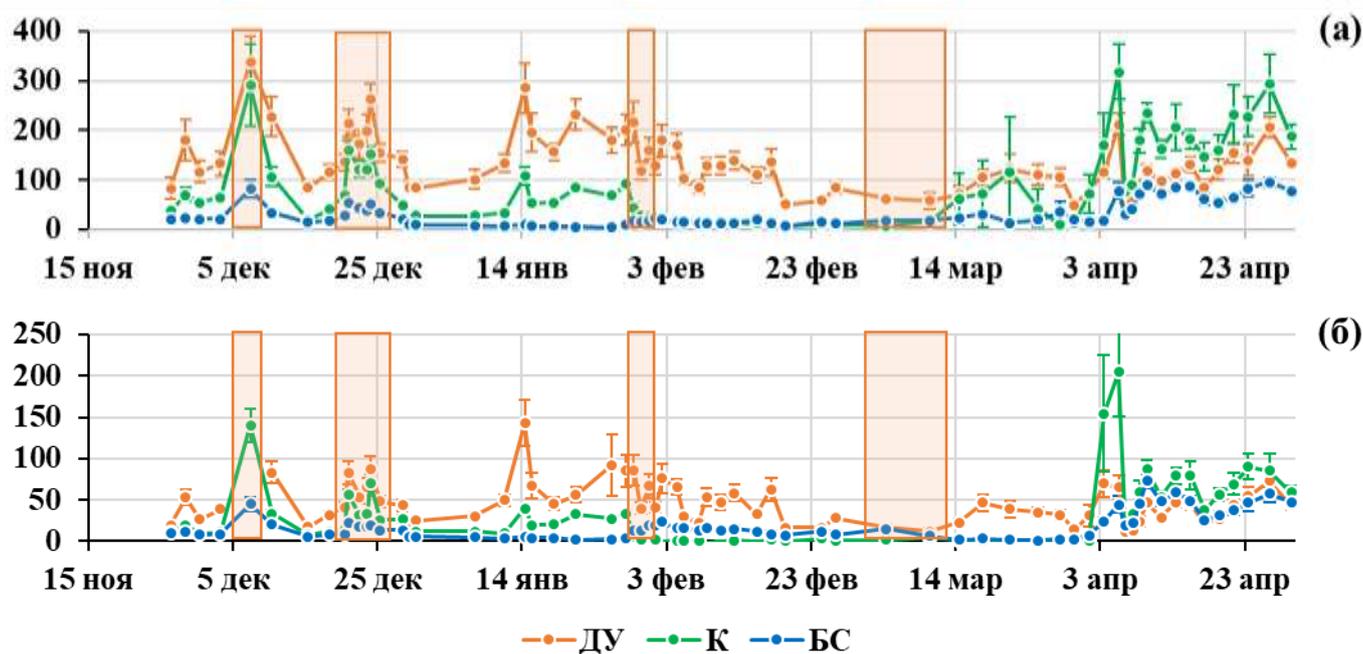


Рис.6. Динамика выделения CO_2 почвами на луговых (а) и паровых (б) делянках по вариантам: (ДУ) – дополнительное утепление, (К) – контроль с естественным снежным покровом и (БС) – без снежного покрова. Выделенными областями показаны периоды оттепелей

Наблюдалась тесная связь между температурой почвы (5 см) и величиной эмиссии CO_2 из почв (логарифмическая зависимость) на варианте без снега ($R^2 = 0.8$ под лугом и $R^2 = 0.6$ на пару) в течение всего морозного периода вплоть до большой 12-ти дневной оттепели в начале марта. На вариантах К и ДУ подобная связь наблюдалась до начала образования устойчивого снежного покрова ($R^2 = 0.58-0.62$ на варианте К; $0.53-0.56$ на варианте ДУ).

Зимние оттепели в декабре приводили к всплеску эмиссии CO_2 из почв (Рис. 2). Четырехдневная оттепель в конце января привела к небольшому увеличению почвенных потоков CO_2 в варианте БС и резкому снижению эмиссии на вариантах К и ДУ, что было обусловлено избыточным увлажнением за счет образования талой воды в камерах (Рис. 1). Продолжительная 11-дневная оттепель в марте не оказала существенного влияния на почвенное дыхание.

Проведенные исследования показали, что суммарные потоки CO_2 с парующих площадок за морозный период в 2015-2016 гг. были сопоставимы с величинами, полученными в подобном эксперименте годом ранее (Kurganova et al., 2016). Вместе с тем, суммарные потоки CO_2 на луговых делянках превосходили аналогичные величины предыдущего года в 1.8-2.4 раза. Это может быть связано как с погодными условиями, так и, вероятно, с естественной



вариабельностью потоков на луговых участках. Поток CO₂ из почвы под лугом на варианте ДУ (394 г С/м²) также значительно превышал потоки на вариантах без снежного покрова и на контроле, что может указывать на возможность существенного увеличения эмиссии CO₂ в зимний период в отсутствие промерзания почвы.

Благодаря теплоизолирующим свойствам, снежный покров существенно ослабляет или полностью разрывает связь между температурой почвы и воздуха (Schindlbacher et al., 2014; Kurganova et al., 2016). В присутствии снега связь между потоками CO₂ из почвы и температурой почвы не проявлялась, что также было показано в данном исследовании. Вариабельность эмиссии CO₂ из почв оставалась достаточно сильной во времени даже после образования устойчивого снежного покрова, однако она уже не была связана ни с относительно стабильной температурой почвы под толщей снега, ни с температурой воздуха.

Заключение

Проведенные исследования позволяют заключить, что наличие снежного покрова оказывало существенное влияние на температурный режим почв в зимний период. Наиболее сильно этот эффект проявлялся в слое 0-10 см на луговых площадках, и в слое 0-20 см – на парующих участках. Промерзание почв, вызванное отсутствием снежного покрова, приводило к значительному снижению эмиссионных потерь CO₂ как из парующих почв, так и почв под луговой растительностью.

Благодарность

Работа выполнялась в рамках государственного задания “Исследование почвенных предшественников, источников и стоков парниковых газов в связи с климатическими изменениями” (рег. № АААА-А18-118013190177-9) при поддержке РФФИ (проект № 18-34-00691 мол_а) и программы Президиума РАН № 51.

Литература

1. Blankinship, J.C., Hart, S.C., 2012. Consequences of manipulated snow cover on soil gaseous emission and N retention in the growing season: a meta-analysis. *Ecosphere* 3, art1. <https://doi.org/10.1890/ES11-00225.1>
2. Brooks, Paul D.; Grogan, Paul; Templer, Pamela H.; Groffman, Peter; Öquist, Mats G.; Schimel, Josh (2011): Carbon and Nitrogen Cycling in Snow-Covered Environments. In *Geography Compass* 5 (9), pp. 682–699. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2011.00420.x. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16724>
3. Kudeyarov, V.N., Kurganova, I.N., 2005. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates. *Euras. Soil Sci.* 38 (9), 983–992.
4. Kurganova, I., Gerenyu, V.L.D., Rozanova, L., Sapronov, D., Myakshina, T., Kudeyarov, V., 2003. Annual and seasonal CO₂ fluxes from Russian southern taiga soils. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 55, 338–344.
5. Kurganova, I.N., Rozanova, L.N., Myakshina, T.N., Kudeyarov, V.N., 2004. Monitoring of CO₂ emission from soils of different ecosystems in Southern part of Moscow region: data base analyses of long-term field observations. *Euras. Soil Sci.* 37 (1), 74–78.
6. Reinmann, Andrew B.; Templer, Pamela H. (2018): Increased soil respiration in response to experimentally reduced snow cover and increased soil freezing in a temperate deciduous forest. In *Biogeochemistry* 140 (3), pp. 359–371. DOI: 10.1007/s10533-018-0497-z.
7. Schindlbacher, A., Jandl, R., Schindlbacher, S., 2014. Natural variations in snow cover do not affect the annual soil CO₂ efflux from a mid-elevation temperate forest. *Glob. Chang. Biol.* 20, 622–632.



8. Wang, W., Peng, S., Wang, T., Fang, J., 2010. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.028>
9. Zamolodchikov, D.G., Karelin, D.V., 2001. An empirical model of carbon fluxes in Russian tundra. *Global Change Biology* 7, 147–161. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00380.x>



УДК 519.876.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ В СИСТЕМЕ УДОБРЕНИЕ-ПОЧВА-РАСТЕНИЕ (НА ПРИМЕРЕ АЗОТА, ФОСФОРА И КАДМИЯ)

Четырбоцкий В.А.

Акционерное Общество «Апатит», Центр Инновации, Москва, Россия

Vchetyrbotskiy@phosagro.ru

Chetyrbotskiy V.A.

Joint Stock Company «Apatit», Innovations Center, Moscow, Russia

Annotation: It is considered the spatial and temporal dynamics of the system, the elements of which are the elements of mobile and stationary forms of plant mineral nutrition (nitrogen, phosphorus and cadmium), microorganisms and plant biomass, as well as parameters of the rhizosphere state (temperature, moisture content, acidity). The mathematical model of this system is formulated.

Keywords: mineral nutrition elements, plant mineral capacity, Mono's formula

Введение

В практике математического моделирования агроценоза, как правило, вне рамок перечисленных исследований остаются важными практические случаи пространственной неоднородности ризосферы, соответствующей этой области различных сообществ микроорганизмов, распределение которых в ризосфере определяется корневыми выделениями растений (экссудаты), фактор внесения удобрений в различные промежутки времени и зависимость поглощения питательных элементов, содержащихся в этих удобрениях, ризосферной органикой от формы их подвижности, а также взаимоотношения между этими формами.

Среди макро- и микроэлементов питания растений, азоту и фосфору принадлежат особые роли.

Азот входит в состав таких важных органических вещества, как белки, нуклеиновые кислоты, нуклеопротеиды, хлорофилл, алкалоиды, фосфатиды и др. Данные соединения играют важную роль в формировании и жизни растений. В среднем его в растении содержится 1-3% от массы сухого вещества.

Фосфор выполняет энергетическую и конституционную функцию в растениях и других организмах, входит в состав многих жизненно важных фосфорорганических соединений, среди которых наибольшее значение имеют АТФ и нуклеиновые кислоты, участвующие в большинстве биохимических процессов энергетического обмена в клетке, передаче наследственной информации, синтезе ферментов, белков, углеводов и других веществ. Содержание фосфора в растениях составляет около 0,2% на сухую массу.

Кадмий занимает первоочередную роль среди многочисленных загрязнителей окружающей среды. Являясь одним из наиболее токсичным для всех живых организмов, во многих странах мира почвы, предназначенные для сельскохозяйственного производства, загрязнены этим металлов вследствие широкого применения высоких доз фосфорных удобрений и гербицидов, а также осадков сточных вод, содержащих в своем составе кадмий.

Перечисленные особенности подчеркивают актуальность разработки динамики комплексной системы, элементами которой выступают предназначенные под различные



виды культивации растения, ризосфера и сообщество ее микроорганизмов, элементы подвижной и неподвижной форм минерального питания растений как важнейших для растений элементов – азот и фосфор, так и ингибитора роста растений - кадмий.

Цель работы состоит в изучении перечисленных проблем. Для каждой отдельной составляющей рассматриваемой системы выполнено построение соответствующей модели с учетом взаимосвязей между ними.

Объекты и методы исследований

Динамические модели характеризуют протекание процесса, где изменение времени полагается непрерывным. В их основе лежат представления о механизмах описываемых явлений. Исходные теоретические сведения о характере рассматриваемых процессов позволяют обоснованно указать класс математических функций для их описания. В общем случае запись таких моделей имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dY}{dt} = F(t, Y, A), \\ Y(t_0, A) = Y_0(A) \end{cases},$$

где $Y = \{Y_i(t, A)\}_{i=1 \div n}$ совокупность динамических переменных модели, а $A = \{A_j\}_{j=1 \div m}$ совокупность ее параметров; $F(t, Y, A) = \{F_i(t, Y, A)\}_{i=1 \div n}$ совокупность функций, которые определяют происходящие в системе процессы; t_0 начальный момент рассмотрения системы; $Y_0(A)$ начальное распределение переменных. Допускается также зависимость A от ряда динамических параметров. В частности, температуры и влажности.

Модель динамики элементов минерального питания

Динамика элементов подвижных форм минерального питания растений определяется их начальным распределением, текущим состоянием ризосферы (температура, влагосодержание, кислотность и ряд других параметров ризосферы), отношениями (связями) между различными элементами и отношениями между элементами подвижных и неподвижных форм, подвижностью элементов. Относительно рассматриваемого случая перечень отношений между разными элементами составляет: конкуренция, симбиоз и нейтральные связи. Полагается также диффузионный механизм пространственного распределения.

Согласно принятым допущениям, запись уравнений динамики концентрации элементов подвижных и неподвижных форм принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_{i,1}}{\partial t} = f_i A_i + \sum_{k=1}^K \gamma_{k,1} \delta(t - t_k) C_{i,k}^{(0)} + D_{i,1} \nabla^2 C_{i,1} \\ \frac{\partial C_{i,2}}{\partial t} = f_i F_i + \sum_{k=1}^K \gamma_{k,2} \delta(t - t_k) C_{i,k}^{(1)} + D_{i,2} \nabla^2 C_{i,2} \\ A_i = (-p_{i,1} - \sum_{j=1}^N q_{i,j} C_{j,1} + G_i - r_{i,1} Y \cdot E_{Y,1}) C_{i,1} + p_{i,2} C_{i,2}, \\ F_k = (-p_{i,2} + \beta_{i,2} S - r_{i,2} Y \cdot E_{Y,2}) C_{i,2} + p_{i,1} C_{i,1} \\ G_i = \alpha_{i,S} S - \beta_{i,B} B (d_i + C_{i,1})^{-1} \\ E_{Y,k} = (d_{Y,k} + C_{i,k})^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

где $i = 1 \div 3$ (азот, фосфор и кадмий); $C_{i,1}$ и $C_{i,2}$ концентрации элементов подвижной и неподвижной формы; $f_i = f_i(T, W, \rho, pH)$ функция состояния среды температуры, влажности, плотности ризосферы и ее кислотности); $p_{i,1}$ и $p_{i,2}$ характеризуют интенсивности взаимных



переходов подвижной и неподвижной форм; B биомасса растений, выражение E_i характеризует массу органики S (она представлена органикой предыдущего периода плюс отмершая часть текущей биомассы растения, которая полагается пропорциональной самой B) и убыль $C_{i,1}$ за счет потребления его растением. Для представления механизма потребления используется формула Моно; d_i некоторая константа, коэффициенты $r_{i,1}$ и $r_{i,2}$ характеризуют убыль концентраций вследствие их потребления микроорганизмами, где $d_{Y,1}$, $d_{Y,2}$ константы, коэффициенты $\gamma_{k,1}$ и $\gamma_{k,2}$ характеризуют внесение удобрений в почву в моменты времени t_k , где $k=1 \div K$; $\delta(t - t_k)$ функция равная нулю при отличном от нуля ее аргументе и равная 1 – в ином случае.

Соотношения

$$\begin{cases} C_{i,1}(0, x, y, z) = C_{i,1}^{(*)}(x, y, z), & C_{i,2}(0, x, y, z) = C_{i,2}^{(*)}(x, y, z) \\ \frac{\partial C_{i,1}}{\partial n} |_{\Gamma} = \varphi_{i,1}, & \frac{\partial C_{i,2}}{\partial n} |_{\Gamma} = \varphi_{i,2} \end{cases}, \quad (1a)$$

где $C_{i,k}^{(*)}(x, y, z)$ $k=1 \div 2$ характеризуют начальное распределение; n нормаль к границе Γ области рассмотрения системы; $\varphi_{i,k}$ $k=1 \div 2$ функции, которые определяют потоки вещества на границе области.

Модель динамики микроорганизмов

Микроорганизмы являются агентами переноса питательных для растений элементов. Их динамика определяется состоянием ризосферы, естественным приростом, элементами подвижной формы (азот, фосфор и т.д.), распределением растений, конкуренцией за пространственный ресурс (микроорганизмы расселяются на поверхности растения) как сообществ одного вида (внутривидовая конкуренция), так и конкуренция между различными видами сообществ (межвидовая конкуренция). Микроорганизмы также конкурируют за питательный субстрат, выделяемый корнями, который является причиной распределения прикорневых микроорганизмов в ризосферном слое $\nabla \cdot (D_{YB} Y \cdot \nabla B)$.

Согласно принятым допущениям модель динамики сообществ микроорганизмов можно записать уравнением:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial t} = f_Y [G \cdot Y + \nabla \cdot (D_{YB} Y \cdot \nabla B) + \nabla \cdot (D_Y \nabla Y)] \\ G = \alpha_Y - s_Y Y + \mu_Y(1) + \mu_Y(2) - \mu_Y(3) + \alpha_{Y,B} B \\ \mu_Y(k) = \sum_{j=1}^N \alpha_{Y,j,k} C_{j,k} (d_{Y,k} + C_{j,k})^{-1} \\ Y(0, x, y, z) = Y^{(*)}(x, y, z) \\ \frac{\partial Y}{\partial n} |_{\Gamma} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где f_Y характеризует воздействие параметров состояния среды на динамику биомассы микроорганизмов, $\{\alpha_{Y,i}, i = 1 \div N\}$ коэффициенты естественной рождаемости микроорганизмов; s_Y характеризует конкуренцию микроорганизмов за выделяемый растениями питательный для них ресурс, $\{\alpha_{Y,j}, j = 1 \div N\}$ характеризует отношения между микроорганизмами и элементами подвижной формы; знак коэффициента отражает тип отношений (плюс-конкуренция, минус – симбиоз, а нулевой значение – нейтральное отношение), набор $\{\alpha_{Y,B,i}, i = 1 \div M\}$ характеризует влияние растения на динамику микроорганизмов.

Модель динамики биомассы растений



Построение модели выполняется при допущении, что динамика биомассы растения определяется состоянием среды, доступной для потребления элементов подвижной формы минералов, конкуренцией растений за питательный для них ресурс и трансформированной уже в органику самой биомассы растений.

Полагается, что прирост отмершей части растений (затем органики) пропорционален текущей биомассе растений.

Согласно принятым допущениям модель динамики сообществ микроорганизмов можно записать уравнением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial B}{\partial t} = f_B(\mu(1) + \mu(2) - \mu(3) + \alpha_{B,y}Y - \beta_B B - \alpha_S)B \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \alpha_S B \\ \mu(k) = \alpha_{B,k} C_{k,1} (d_{B,k} + C_{k,1})^{-1} \\ B(0, x, y, z) = 0, \quad S(0, x, y, z) = S^{(*)}(x, y, z) \\ B|_{\Gamma} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial n}|_{\Gamma} = \varphi_S \end{array} \right. , \quad (3)$$

где f_B характеризует состояние среду ризосферы; $\alpha_{B,1}, \alpha_{B,2}, \alpha_{B,3}$ коэффициенты пропорциональности для азота, фосфора и кадмия; β_B характеризует конкуренцию растений за питательный для них ресурс; α_S характеризует долю отмершей биомассы; S текущая масса органики; $d_{B,1}, d_{B,2}$ и $d_{B,3}$ константы формулы Моно; $S^{(*)}(x, y, z)$ масса органики, которая перешла в рассматриваемый период; φ_S потоки органики на границе области. В (3) характеризует $\alpha_{B,y}$ характеризует влияние микроорганизмов.

Выводы

Разработана математическая модель системы, составляющими которой выступают элементы минерального питания подвижной и неподвижной форм азота, фосфора и кадмия, сообщество микроорганизмов, биомасса растений и биомасса органического вещества. Выполнена формализация связей между составляющими системы.

Необходимо заметить, что данные уравнения приведены к форме для построения комплексных программ.

Благодарность

Автор выражает благодарность А.Н. Четырбоцкому за неоценимую поддержку во всех научных аспектах и начинаниях, а также просветления к становлению на путь научной карьеры, Б.В. Левина за формирование перспективного научного направления и поддержку в области химии процессов, происходящих в ризосфере, М.В. Стеркина, а также руководство АО «Апатит» за предоставление возможности заниматься научной деятельностью по интересующим направлениям.



УДК 628.381.1

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЙМЕННОЙ ПОЧВЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ

Щепотьев В.Н., Дмитренко В.Н.

ФБГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
v.shepotiev@yandex.ru, wnd@land.ru

CHANGE OF AGRO-PHYSICAL PROPERTIES OF FLOODPLANE SOIL WHEN USING SEWAGE SLUDGE AS ORGANIC FERTILIZER

Shepot'ev V.N., Dmitrenko V.N.

FBGNU Soil Institute. V.V. Dokuchaeva, Moscow, Russian Federation

Annotation: The influence of the use of sewage sludge from food production as an organic fertilizer on the physical properties of floodplain soil is studied. Their use is proposed to restore the physical parameters of degraded soils, increase fertility and increase crop yields.

Введение

Пойменные аллювиально-дерновые почвы обладают высоким уровнем потенциального плодородия и широко используются в агропромышленном производстве. Интенсивное использование пойменных почв без соответствующих компенсационных мер по их сохранению, сопровождается сменой естественной растительности, многократными механическими обработками, выносом основной массы органического вещества с урожаем, обеднением гумусовыми веществами и изменением почвенных процессов, следствием чего является снижение продуктивности и деградация почвы. В целом, рост негативных явлений приводит к переуплотнению пашни, ухудшению структуры, изменению водно-воздушного баланса, снижению подвижности влаги и доступности питательных элементов, уменьшению биологического разнообразия и микробиологической активности. Нахождение в напряженных производственных условиях может привести к изменению естественных процессов почвообразования и утрате исходно благоприятных агрофизических свойств аллювиальных почв.

Для сохранения плодородия пойменной почвы необходимо поддержание бездефицитного баланса органического вещества применением органических удобрений позволяющих компенсировать потери гумуса и элементов питания из почвы при отчуждении с урожаем и положительно воздействовать на физические, химические и биологические свойства почв.

Одним из способов обогащения почвы органическим веществом, может являться использование осадков сточных вод (ОСВ) очистных сооружений предприятий пищевой промышленности. В отличие от ОСВ городских очистных сооружений, состав стоков предприятий стабилен и легко контролируем. Илы, образующиеся в процессе биологической очистки стоков, представляют собой биомассу, близкую по составу к сообществу почвенной биоты. Следовательно, внесение ОСВ в почву способно стимулировать почвенные процессы не только как резерв питания, но и как биологически активный компонент. Использование компостов на основе ОСВ не является новинкой и широко распространено за рубежом. Это позволяет решать задачи рационального природопользования - утилизации продуктов переработки и снижения деградации земель.



Особенностью исследования является изучение возможности использования ОСВ очистных сооружений кондитерской фабрики в качестве удобрения в полевом растениеводстве без предварительного компостирования.

Объекты и методы

Исследования проводятся в Московской области с 2016 г. на поле ЗАО СП "Жилёвское", расположенного на левом берегу р. Оки, в пределах хорошо дренированной центральной поймы используемой для выращивания сельскохозяйственной продукции. Почва опытного участка аллювиальная темно гумусовая на слоистых суглинках с песчаными прослойками. Мощность гумусового слоя 37-40 см. В качестве органического удобрения использовались ОСВ - смесь аэробного и анаэробного реакторов очистных сооружений промышленно-пищевого предприятия. ОСВ состоит из илистой взвеси тонкодисперсных минеральных и органических веществ, ферментов, микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Удобрения вносились весной, перед посевом, при проведении основной обработки почвы. Варианты опыта составляли: 1. Контроль – без удобрения; 2. Удобрение ОСВ - 100 т/га; 3. Удобрение ОСВ - 200 т/га.

Для оценки физических параметров почвы исследования проводили в 2 срока – весной, в момент закладки опыта и в конце вегетационного периода, по достижении почвой равновесного состояния. Проведено изучение основных физических свойств почвы - плотности сложения, твердости, пористости, влажности, водопроницаемости, структурного состава и урожайности. Биологическую активность почвы определяли по количеству ходов дождевых червей на единицу площади в изучаемых слоях.

Результаты и обсуждение

По результатам исследований (табл. 1) установлено, что для современной почвы находящейся в сельскохозяйственном использовании характерно уплотненное сложение пахотных и подпахотных горизонтов. На контрольных вариантах, без внесения ОСВ, агрофизические показатели соответствуют деградированному состоянию. Плотность сложения пахотного слоя выше оптимальных значений ($1 - 1,3 \text{ г/см}^3$), а в подпахотных слоях приближаются к нижней границы максимально возможной степени уплотнения $1,7-1,8 \text{ г/см}^3$, при которой происходит необратимое разрушение структурного сложения почвы с потерей плодородия [3]. Глубина распространения уплотняющих деформаций доходит до 50 см.

Использование ОСВ приводит к улучшению свойств почвы и поддержанию их в оптимальном диапазоне. В результате снижаются - плотность сложения на 15 – 20%, твердость в 2 – 2,5 раза; увеличиваются - общая пористость на 3 – 8%, пористость аэрации на 12 – 18%, влагоемкость и водопроницаемость в 1,5 – 2 раза. В структурном составе почвы возрастает количество ценных и водопрочных агрегатов. Положительная трансформация свойств происходит в год внесения и прослеживается в течении 4 лет, как в пахотных, так и в подпахотных слоях почвы.

Влияние ОСВ на структурно-агрегатный состав способствует усилению агрегирования в корнеобитаемых слоях, созданию благоприятной комковато-зернистой структуры, которая в свою очередь оптимизирует условия для роста и развития сельскохозяйственных растений. Так, количество агрономически ценных агрегатов при использовании ОСВ варьировало по вариантам в пределах 55 – 67 %, по сравнению с контролем (22-50%). Применение ОСВ позволило повысить коэффициент структурности в 2 -2,5 раза, до 1,22 – 1,98, что указывает на хорошее агрегатное состояние. Полученные данные свидетельствуют о лучших в



агрономическом и экологическом отношении показателей структуры почвы в вариантах с применением ОСВ по сравнению с контрольными вариантами.

Таблица 1. Изменение физических показателей аллювиальной почвы на опыте с применением активного ила

| Показатель | Глубина слоя, см | Вариант опыта | | | Диапазон изменений |
|--|------------------|---------------|----------|----------|--------------------|
| | | Контроль | 100 т/га | 200 т/га | |
| Плотность, г/см ³ | 0 - 25 | 1,47 | 1,39 | 1,35 | - 6 – 9% |
| | 26 – 50 | 1,52 | 1,44 | 1,40 | - 6 – 9% |
| Твердость, кПа | 0 - 25 | 158 | 68 | 52 | - 2,5 раза |
| | 26 – 50 | 154 | 90 | 90 | - 1,7 раза |
| Пористость общая, % | 0 - 25 | 45 | 48 | 49 | + 7-9% |
| | 26 – 50 | 43 | 45 | 47 | + 5-9% |
| Пористость аэрации, % | 0 - 25 | 19 | 24 | 26 | + 26-37% |
| | 26 – 50 | 17 | 20 | 21 | + 18-24% |
| Глыбистые агрегаты >10 мм % | 0 - 25 | 48,5 | 28,5 | 31 | - 1,7-1,5 раза |
| | 26 – 50 | 42 | 32 | 27 | - 1,3- 1,6 раза |
| Агрономические ценные агрегаты 10 – 0,25 мм, % | 0 - 25 | 48 | 67 | 64 | + 40-33 % |
| | 26 – 50 | 55 | 65 | 60 | + 18- 10 % |
| К фильтрации мм/мин | 0 - 10 | 0,99 | 1,23 | 1,84 | + 1,5 – 2 раза |
| Активность мезофауны, шт/0,1м ² | 0 - 25 | 5,3 | 9,3 | 11,8 | + 1,7-2 раза |
| | 26 – 50 | 3,5 | 4,8 | 6,3 | + 1,4-1,8 раза |

Различия по влиянию количества ОСВ на физические показатели почвы в пахотном слое незначительны, но с увеличением количества ОСВ до 200 т/га улучшение состояния почвы прослеживается до большей глубины. Это связано с улучшением физического состояния верхней части профиля и активным перемещением продуктов трансформации вносимых веществ действием просачивающейся влаги и деятельностью почвенных организмов. При внесении отходов в почвенной массе увеличивается количество органических и минеральных веществ в зоне их распространения. Представляющие собой смесь тонкодисперсного субстрата с большим количеством активных коллоидов и биогенных компонентов отходы



оказывают разуплотняющее действие, как в зоне внесения, так и в более глубоких слоях [3]. Механизм разуплотнения почвы связан, с процессами набухания и усадки активных коллоидов, увеличением количества органоминеральных комплексов участвующих в образовании почвенных агрегатов и активным развитием почвенных организмов. В результате повышается функциональность протекания почвенных процессов влияющих на водный, воздушный и пищевой режимы. На полях с применением ОСВ возрастает урожайность культур (Рис. 1) и снижаются затраты на обработку почвы.

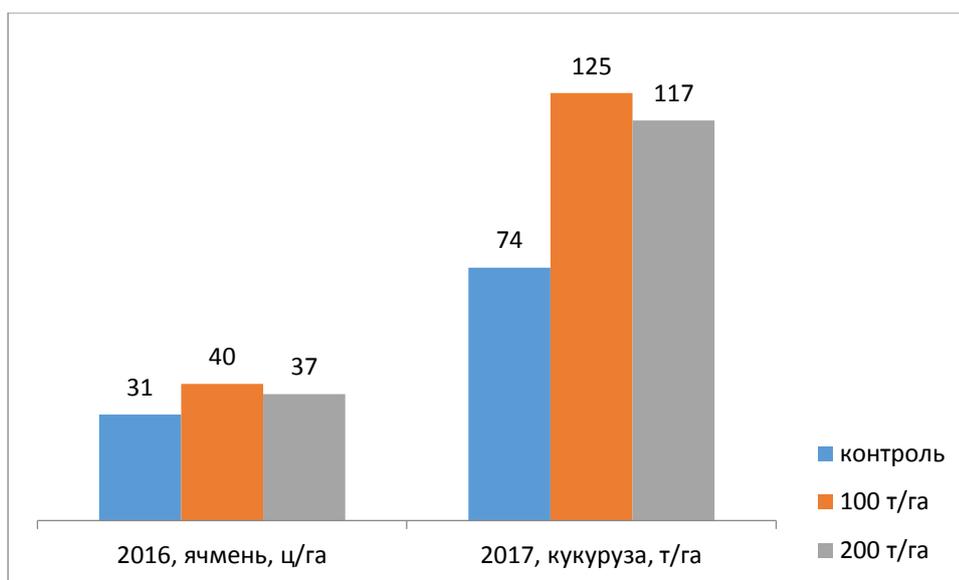


Рис. 1. Урожайность возделываемых культур на вариантах опыта

Как видно из диаграммы, применение удобрений на основе некомпостированных активных илов позволяет получить прибавку к урожаю 30-50%, в зависимости от культуры и метеоусловий.

Выводы

В концепции современного земледелия основанной на экологическом подходе предполагается рациональное использование всех ресурсов. Утилизация отходов в удобрение является эффективным способом компенсации органического вещества и борьбы с физической деградацией почвы. При этом одновременно решается ряд задач: исключается необходимость хранения (захоронения), повышается плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур, не загрязняется окружающая природная среда.

Литература

Белюченко И.С. Дисперсные и коллоидные системы отходов и их коагуляционные свойства // Экол. Вестник Сев. Кавказа – 2013. – Т. 9. – №1 – С. 13-38

Деградация и охрана почв / Под ред. Г. В. Добровольского. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 654 с.

Уткаева В.Ф., Щепотьев В.Н. Деградация физических свойств аллювиальных почв в результате агротехногенеза Доклады РАСХН. 2003. №5. С. 28-30.



СЕКЦИЯ 4. МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ



EFFECT OF SODIUM DODECYLBENZENE SULFONATE (SDBS) ON SOIL AGGREGATE STABILITY

Barzegar Ganbary A.¹, Oustan S.², Aliasgharzarad N.³, Neyshabouri M.R.⁴, Lotfollahi Markid A.⁵

¹ Soil science department, Faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
alibarzegar41@yahoo.com

² Soil science department, Faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
oustan@hotmail.com

³ Soil science department, Faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

⁴ Soil science department, Faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
neyshabouri@tabrizu.ac.ir

⁵ Soil science department, Faculty of agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Lotfollahimarkid@gmail.com

Introduction

Sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) is an anionic surfactant which is in use as a main component of household detergents. This detergent is added to soil by application of sewage sludge, sewage effluent and herbicides which negatively affects the physical, chemical and biological properties of the soil and therefore its quality. Particularly, dynamic soil quality changes immediately in response to use of SDBS. Surfactant sorption can affect the physical and chemical properties of the surfaces of the soil pores and thus reduces its permeability (Renshaw et al., 1997). The surface tension of soil solution decreases with addition of SDBS. This increases soil wettability and decreases capillary force that leads to less evaporation (Cruz et al., 2017). Nevertheless, Mobbs et al. (2012) have been shown that application of an anionic surfactant did not improve water conservation in cropping soils. The degree of soil aggregate stability is considered as a key factor for evaluating soil quality and health (Herrich et al., 2001). Moiocoviks et al. (2011) found that aggregate stability of soils increased after addition of a cationic surfactant. In another study, the hydraulic conductivity of soils decreased after injection of an anionic surfactant. This observation was attributed to disruption of soil aggregates and pore clogging (Peng et al., 2017). Similar results have been reported by Mingorance et al. (2007). Abu-Zreig et al. (2003) also observed a decrease in the infiltration rate when the surfactant was applied. In contrast, Lehrs et al. (2011) reported no difference in infiltration rate between the presence and the absence of a surfactant.

Objects and methods

The aim of this study was to evaluate the impact of an anionic surfactant (SDBS) on some physical soil quality indices in a soil. For this purpose, a Loam, slightly calcareous non-saline soil rich in organic carbon was selected. The soil was taken from the top 25 cm of an agricultural land near Osku area in southwest of Tabriz, Iran. After air drying and sieving (2 mm in diameter), some soil physical and chemical properties including texture, pot capacity (PC), pH, EC (electrical conductivity), CEC (cation exchange capacity), CCE (calcium carbonate equivalent), OC (organic carbon) were determined by common methods. A completely randomized experimental design (CRD) involving four levels of sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS): 0, 0.01, 0.05 and 0.25 percent with three replications was adopted. SDBS was purchased from Merck. To run the experiment, 15 kg of soil (on dry weight basis) was placed into each of 12 polyethylene pots with dimensions of 29×37×20 cm. The soils were spiked with above mentioned levels of SDBS through spraying method. Small holes were made at the top to facilitate aeration. The soils were incubated



at 0.7-0.8 pot capacity moisture content and at room temperature for 95 days. The moisture content of the soils was checked and kept almost constant by daily weighting and then watering of pots. At the end of experiment, soil properties including saturation percentage (SP), bulk density (BD), aggregate stability index (ASI), pH and EC were determined. ASI was determined according to the method proposed by Kemper and Rosenau (1986). In addition, concentrations of sodium, calcium and magnesium in saturation extract were measured to calculate sodium adsorption ratio (SAR) values. The text may contain references to the used literature (Hawking, 2000; Ivanov, Petrov, 2001).

Results and discussion

Some properties of the soil used in this research work are presented in Table 1.

Table 1. Some properties of the study soil.

| Property | Values |
|-------------|--------|
| Clay (g/kg) | 149 |
| Silt (g/kg) | 315 |
| Sand (g/kg) | 536 |
| PC (%) | 31 |
| CCE (g/kg) | 28 |
| OC (g/kg) | 27 |
| EC (dS/m) | 0.42 |
| pH | 7.39 |

PC: pot capacity, CCE: calcium carbonate equivalent, OC: Organic content, EC: Electrical conductivity.

According to the results from Table 2, the effect of SDBS on SP, BD and pH was not significant, but a significant effect of SDBS on ASI was observed. Also, EC and SAR were significantly affected by addition of SDBS. Figure 1 indicates that the addition of SDBS to soil at levels of 0.01 and 0.05 percent did not have any significant effect on ASI compared to control. However, at a higher level of SDBS (0.25 percent) a significant decrease in ASI was observed. Though, no significant difference was observed between the values of ASI obtained at this level of SDBS and lower levels.

Table 2. Analysis of variance of the effect of SDBS on some soil physical properties.

| Source of variation | Degree of Freedom | Mean of Squares | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------|--------|---------------------|---------|
| | | SP | BD | ASI | EC | pH | SAR |
| SDBS | 3 | 14.88 ^{ns} | 0.002 ^{ns} | 194.3** | 2.56** | 0.038 ^{ns} | 204.1** |
| Error | 8 | 11.80 | 0.001 | 23.3 | 0.44 | 0.372 | 8.1 |

SP: Saturation percentage, BD: Soil bulk density, ASI: Aggregate stability index, EC: Electrical conductivity, SAR: Sodium adsorption ratio. ns: Non-significant, **: Significant at the 1 percent probability level.

Many researchers have reported the decreased effect of SDBS on soil hydraulic conductivity (Liu and Roy, 1995). Abu-Zreig et al. (2003) believe that the surface tension and contact angle are not the responsible factors for the hydraulic conductivity reduction, since water moves mostly in large pores, in which the capillary force is not significant. They attributed the reduction to the breakdown of soil aggregates. In this way, the migrated particles can clog soil pores and reduce hydraulic conductivity. The breakdown of soil aggregates induced by anionic surfactants including SDBS and sodium dodecylsulfate (SDS) may be a result of sodium (Na⁺) dissociation from these



two components (Peng et al., 2017). The adverse impact of sodium ions on stability of soil structure have been reported previously (Misra and Sivongxay, 2009). Introduction of large amounts of sodium into soil can cause sodicity problems, especially when the soil contains low levels of calcium and magnesium ions. In this research, the addition of SDBS significantly increased SAR levels (Figure 2).

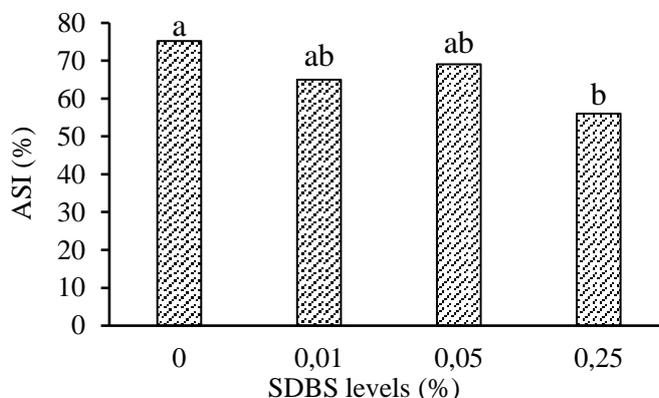


Figure 1. Comparison of means for the effect of SDBS on soil aggregate stability index (ASI) (Duncan's test at the 0.05% level).

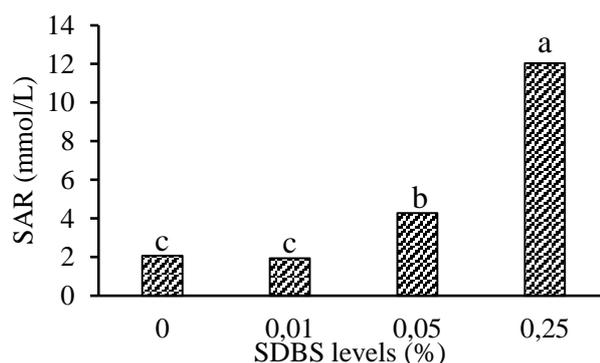


Figure 2. Comparison of means for the effect of SDBS on soil sodium adsorption ration (SAR) (Duncan's test at the 0.05% level).

The addition of SDBS at level of 0.01 percent did not show any significant effect on SAR compared to control. However, higher levels of SDBS (0.05 and 0.25 percent) significantly increased the sodicity of soil (approximately two-fold and six-fold increase in SAR compared to control, respectively). On the other hand, SDBS can complex calcium and magnesium ions in soil solution. This decreases the activity of these divalent ions, causing more displacement of sodium ions in soil solution to exchange sites. The latter disperses soil colloids and drastically reduces ASI values. However, a huge amount of SDBS was added to soil at the level of 0.25 percent. This treatment received SDBS much more than what soil may commonly receive by application of sewage effluent or sludge. Application of sewage sludge to soil can result in levels of surfactant that are generally between 0 and 3 mg/kg (Scott and Jones, 2000). Although, some researchers used much higher concentrations of SDBS up to 0.1% in their pot experiments (Mieure et al., 1990). Despite receiving high amounts of SDBS at 0.25 percent level, less than 20 percent decrease in ASI was recorded compared to control. This observation may be due to an increase in soil salinity that attenuate the effect of soil sodicity. Figure 3 indicates that the addition of SDBS to soil at the level of 0.01 percent



did not have any significant effect on EC compared to control. However, at the higher level of SDBS (0.05 percent) a significant increase in soil EC was observed. Though, no significant difference was observed between the values of soil EC obtained at this level of SDBS and the lower level. An increase in soil electrical conductivity (more than two-fold at the SDBS level of 0.25 percent compared to control) results in a flocculating effect on soils. Flocculation is generally promoted when the soil solution EC exceeds a critical value of approximately 1.5 dS/m (Warrence et al., 2002).

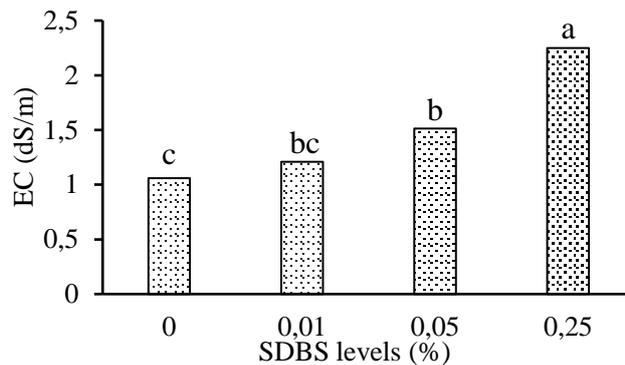


Figure 3. Comparison of means for the effect of SDBS on soil electrical conductivity (EC) (Duncan's test at the 0.05% level)

Conclusions

Surfactant supplementation influences the stability of aggregates and hydraulic conductivity of soils. The aim of this study was to evaluate the impact of an anionic surfactant (sodium dodecylbenzene sulfonate) on some physical soil quality indices in a soil. For this purpose, four levels of SDBS (0, 0.01, 0.05 and 0.25%) were added to a soil and incubated for 95 days. Then, soil properties including saturation percentage, bulk density, aggregate stability index (ASI), pH EC and SAR were determined. Based on results, the effect of SDBS on SP, BD and pH was not significant, but ASI, EC and SAR were significantly affected by addition of SDBS. Further work should concentrate on dual effect of SDBS application on soil aggregate stability through influencing soil salinity and sodicity. Finally, both parameters of soil (EC and SAR) plays an important role in influencing the ASI values.

Acknowledgment

The work was carried out with the support of the University of Tabriz.

References

- Abu-Zreig M., Rudra R.P., Dickinson W.T. (2003) Effect of application of surfactants on hydraulic properties of soils. *Biosyst. Eng.* **84**, 363–372.
- Cruz B.C., Furrer J.M., Guo Y. S., Dougherty D., Hinestroza H.F., Gage D.J., Cho Y.K., Shor L.M. (2017) Pore-scale water dynamics during drying and the impacts of structure and surface wettability. *Water Resources Research* **53**(7), 5585–5600.
- Herrick J., Whitford W., De Soyza A., Van Zee J., Havstad K., Seybold C., Walton M. (2001) Field soil aggregate stability kit for soil quality and rangeland health evaluations. *Catena* **44**, 27-35.



- Kemper W., and Rosenau R. (1986) Aggregate stability and size distribution. Pp. 425–442. In: Klute A (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd edition. SSSA, Madison, WI.
- Lehrsch G.A., Sojka R.E., Reed J.L., Henderson R.A., Kostka S.J. (2011) Surfactant and irrigation effects on wettable soils: Runoff, erosion, and water retention responses. *Hydrol. Process.* **25**, 766–777.
- Liu M.W., and Roy D. (1995) Surfactant-induced interactions and hydraulic conductivity changes in soil. *Waste Manag.* **5**, 463–470.
- Mieure J.P., Waters J., Holt M.S., Matthijs E. (1990) Terrestrial safety assessment of linear alkylbenzene sulfonate. *Chemosphere* **21**, 251–62.
- Mingorance M.D., Gálvez J.F., Peña A., Barahona E. (2007) Laboratory methodology to approach soil water transport in the presence of surfactants. *Colloids Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.* **306**, 75–82.
- Miókovic E., Széplábi G., Makó A., Hernádi H. and Hermann T. (2011) Effects of surfactants on the aggregate stability of soils. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry* **39**, 127-131.
- Misra, R.K., Sivongxay, A. (2009) Reuse of laundry greywater as affected by its interaction with saturated soil. *J. Hydrol.* **366**, 55–61.
- Mobbs T.L., Peters R.T., Davenport J., Evans M., and Wu J. (2012) Effects of four soil surfactants on four soil-water properties in sand and silt loam. *Journal of Water and Soil Conservation* **67(4)**, 273-281
- Peng Z., Darnault C.J.G., Tian F., Baveye P.C., and Hu H. (2017) Influence of anionic surfactant on saturated hydraulic conductivity of loamy sand and sandy loam soils. *Water* **9(433)**, 1-15.
- Renshaw C.E., Zynda G.D., and Fountain J.C. (1997) Permeability reductions induced by sorption of surfactant. *Water Resources Research* **33(3)**, 371-378.
- Scott M.J., Jones M.N. (2000) The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochimica et Biophysica Acta* **1508**, 235-251.
- Warrence N.J., Bauder J.W., and Pearson K.E. (2002) Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties. Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University, Bozeman, MT:1-29.



ОЧИСТКА ПОЧВЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ БИОУГЛЯ ИЗ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

Kerimkulova M.R.^{1,2}, Mansurov Z.A.^{2,4}, Kozybaeva F.E.³, Oshakbayeva Zh.O.¹

¹Kazakh national agrarian university, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry after U.U. Uspanov, Almaty, Kazakhstan

⁴al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Исследована почвенная поверхность зоны влияния цинкового завода г.Риддер, Восточно-Казахстанской области. При отборе почвы было выявлено, что большая площадь почвы лишена растительности. Было установлено повышенные концентрации тяжелых металлов в почве превышающие предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 10 и более раз. С целью снижения концентрации ТМ в почве использован биоуголь, полученный из рисовой шелухи при $t=650^{\circ}\text{C}$. Обладает большой удельной поверхностью $292,5 \text{ м}^2/\text{г}$, объем пор $0,125 \text{ см}^3/\text{г}$. Показана возможность очистки почвы от ионов тяжелых металлов с помощью биоугля.

Keyword: biochar, soil, heavy metal, zinc, lead, carbonation, remediation, pyrolysis, biomass

Введение

В биосферу Земли поступает более 500 тыс. химических веществ – продуктов техногенеза, большая часть которых аккумулируется в почве. Особое место среди них занимают тяжелые металлы, которое по степени опасности уступают только пестицидам [1]. Предприятия цветной и черной металлургии ежегодно выбрасывает соединения Cu – более 150, Zn – 120, Pb – около 90, Ni – 12, Mo – 1,5 тыс. т, а Co – 800, Hg – 30 т. Отходы машиностроительных и химических производств содержат соединения Pb – до 1, Cu – до 3, Cr, Fe, Ni, Ni – до 10 г/кг. С выхлопными газами в течение года на поверхность почв попадает более 250 тыс. т свинца. В результате деятельности человека содержание металлов в почвах может превышать их естественные концентрации в сотни и тысячи раз [2]. Тяжелые металлы оказывают негативное воздействие на состав, свойства почвы и на ее плодородие. Причины негативного влияния ТМ на биологические свойства почв заключаются в том, что эти металлы, связываясь с сульфгидрильными группами белков, с одной стороны, подавляют синтез белков, в том числе и их ферментов, с другой – изменяют проницаемость биологических мембран, что приводит к нарушению обмена веществ [3]. ТМ ингибируют процессы минерализации и синтеза различных веществ в почвах, подавляют дыхание почвенных микроорганизмов, вызывают микробостатический эффект, могут выступать как мутагенный фактор. ТМ оказывают угнетающее воздействие на ферментативную активность почвы [4]. Поступая из почвы ТМ по пищевой цепи по оказывают токсическое действие на растения, животных и человека [5].

В настоящее время существуют различные способы восстановления загрязненных ТМ земель, среди которых наиболее экономичным и эффективным является сорбционный метод очистки с использованием биоугля. Биоуголь – это богатый углеродом продукт, получаемый путем термической обработки дерева, навоз, листья и т.д., без доступа кислорода [6]. В зависимости от уровня и типа загрязнения применяют минеральные сорбенты как глина, цеолиты, апатиты. Эти сорбенты вносятся на глубину и не подлежат к извлечению и утилизации. Применяемые сорбционные материалы должны иметь хорошую сорбционную емкость, не подвергаться биодеградации, быть устойчивыми к перепаду температур. В последнее время, в литературе представляются различные сорбенты из растительного сырья



(опилки, лигнин, отходы хвои и т.д.), позволяющие очищать почву от ионов тяжелых металлов. Разработка новых видов биоуглей из ежегодно возобновляемого сырья (рисовая шелуха, скорлупа грецких орехов) для очистки почвы является актуальным как в научном, так и в практическом применении. Данные характер биоугля способствуют реабилитации загрязненных почв тяжелыми металлами [7-8].

Объекты и методы

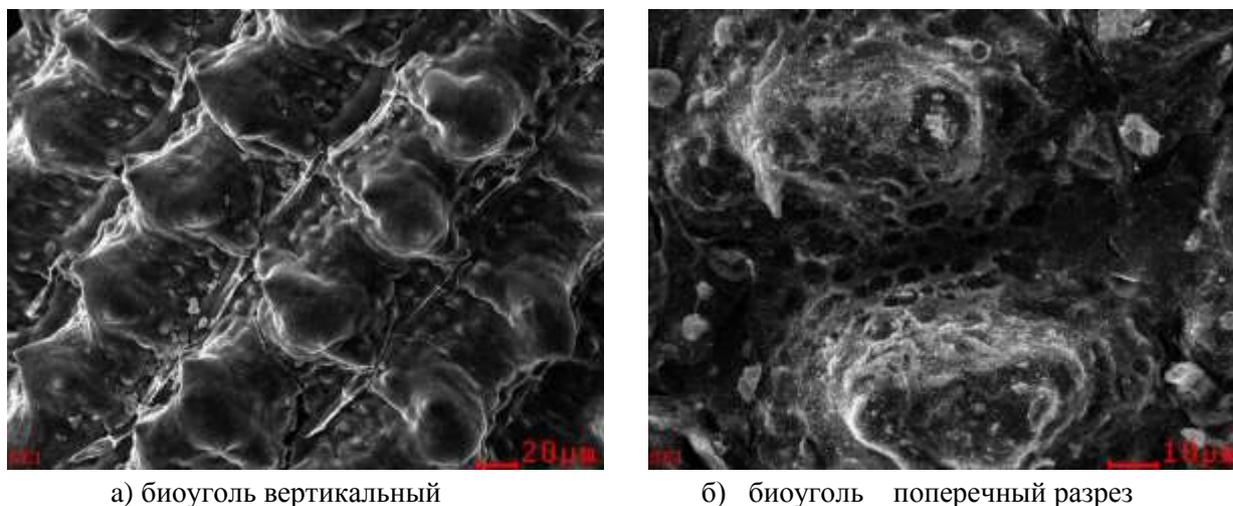
Объектами исследования являлись биоуголь, чернозем выщелоченный, загрязненный тяжелыми металлами от выбросов цинкового завода города Риддер Восточно-Казахстанской области. Для получения биоугля использовали реактор для карбонизации. Влияние выбросов промышленных предприятий на почвенно-растительный покров определяли по эродированным процессам, по внешним признакам растений, их гибели и отсутствию. Загрязненная почва была отобрана методом конверта, с участка близлежащего к цинковому заводу. Подготовка почвы к аналитическим исследованиям проводилась по ГОСТу 17.4.3.01-83[9]. Почву высушили до воздушно-сухого состава по ГОСТу 5180-75 [10]. Качество почвы проверяли по ГОСТу Р ИСО 114 65-2011[11]. Предварительная подготовка почвы для физико-химического анализа. Поверхностные и структурные характеристики биоугля определяли на анализаторе «Сорботметр-М» методом ВЕТ, сканирующей электронной микроскопией и ЭД спектрометра типа JED-2300 EDS фирмы «JEOL», Япония, рентгенофлуоресцентные исследования образцов почвы и биоугля проводили на микроанализаторе «ФОКУС - М2М» с использованием Fe-излучения в диапазоне от 2 до 37 В.

Результаты и обсуждение

Для получения биоугля использовали рисовую шелуху (Баканас, Алматинская область) которая является ежегодно возобновляемым отходом растительного происхождения. В целях извлечения пылевидные остатки риса, шелуху промывали водой и сушили в сушильном шкафу при температуре 120°C. Далее шелуху карбонизовывали в лабораторном реакторе при температуре 650°C в течение часа в инертной среде потоке Ar.

После, методом низкотемпературной адсорбции азота определили удельную поверхность ($S_{уд}$, м²/г) и суммарный объем пор (V_{Σ} , см³/г) полученного биоугля. В результате получили $S_{уд} = 292,5$ м²/г, $V_{\Sigma} = 0,125$ см³/г.

Для определения морфологии поверхности биоугля были получены микроснимки (рис. 3) методом сканирующей электронной микроскопией.



а) биоуголь вертикальный

б) биоуголь поперечный разрез

Рис. 3. SEM micrograph of biochar



На микрофотографиях видно, что образцы сохраняют структуру растительной ткани. Размер их частиц варьирует в интервале от 5 до 200 мкм; на поперечном разрезе частиц видно, что они не монолитны, а имеют слоистую пористую структуру.

В загрязненном почвенном образце были определены: pH-7,85; содержание гумуса 5,31%; общий азот 0,120 %; подвижный фосфор (P_2O_5) 35 мг/кг; цинк 8804,84 мг/кг; свинец 429,2 мкг/кг. В незагрязненной почве (исходное состояние) гумус 6,9 %. Влияние ТМ на органический гумус, деградируют почву, так как происходит снижение гумуса до 24 %.

Для определения эффективности полученного нами биоугля, в почву добавляли 0,5%; 1%; 2% биоугля, также был подготовлен контрольный образец почвы без биоугля (рисунок 4). Каждый вариант в 3-х кратной повторности. Образцы выдерживали в статических условиях при комнатной температуре ($21 \pm 1^\circ C$).

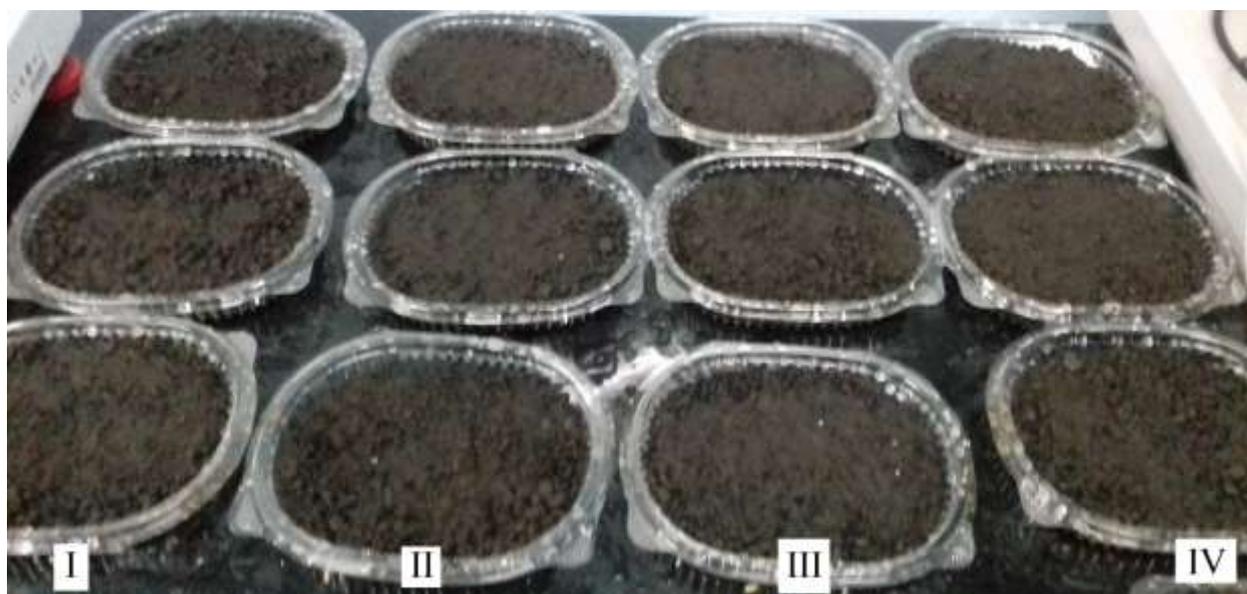


Рис. 4. Образцы почвы с биоуглем (0,5% - II, 1%-III, 2%-IV) и контрольный образец без биоугля (I)

После 60 суток инкубационного периода эффективность биоугля оценивали по уровню изменения элементного состава всех образцов. Результаты анализа приведены в таблице 2.

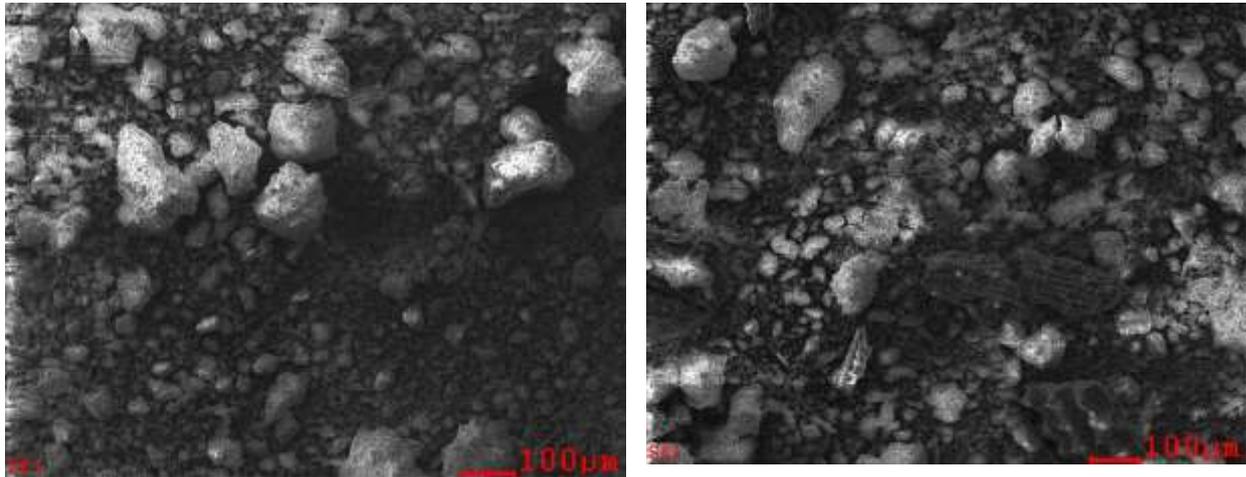
Таблица 2 – Элементный состав образцов почвы и биоугля, %

| Элементы | Биоуголь | Почва (контроль) | Почва+Биоуголь (смесь) | | |
|----------|----------|---------------------|------------------------|--------|--------|
| | | | 0,5 % | 1% | 2% |
| Fe | 0,419 | 42,16 | 35,390 | 37,744 | 37,035 |
| Zn | 0,096 | 25,748 | 25,65 | 21,914 | 18,972 |
| K | 12,925 | 4,385 | 3,996 | 4,814 | 6,296 |
| Ca | 4,397 | 0,965 | 1,126 | 1,351 | 1,485 |
| Ti | - | 0,996 | 0,948 | 0,872 | 1,228 |
| Mn | 0,763 | 0,233 | 0,344 | 0,243 | 0,446 |
| Cu | 0,092 | 0,360 | 0,465 | 0,352 | 0,522 |
| Pb | - | 2,235 | 1,864 | 1,132 | 0,356 |



Данные элементного анализа говорят о том, что 2% биоуголь снижает содержание цинка в почве от 25,748 % до 18,972 % и свинца от 2,356 % до 0,356 %. Эти данные свидетельствуют о том, что смесь почвы с биоуглем приводит к снижению концентрации тяжелых металлов в почве.

Также в целях определения устойчивости биоугля были сделаны электронные микроснимки смеси почвы с 2 % биоуглем после 60 дней инкубации. Результаты представлены на рис. 5.



а) контрольный вариант без биоугля

б) с биоуглем после 60 дней инкубации

Рис 5. SEM micrograph of soil and soil with biochar

Как видно из электронного микроснимка смеси почвы с 2% биоуглем после 60 дней инкубации биоуголь не подвергается биодegradации. Некоторые частицы биоугля сохранили свою пористую структуру.

Тяжелые металлы оказывая негативное воздействие на состав, свойства почвы ухудшает ее плодородие. Это связано с тем, что тяжелые металлы связываясь с сульфгидрильными группами белков, подавляют синтез белков и их ферментов, также изменяют проницаемость биологических мембран, что приводит к нарушению обмена веществ. Под действием тяжелых металлов происходят нарушения в структуре почвенного микробиоценоза, наблюдается снижение численности отдельных агрономических ценных групп микроорганизмов [3-12].

Для определения влияния биоугля на биологические свойства загрязненной тяжелыми металлами почвы, были посажены зерна пшеницы сорта "Арай" в образцах почвы с биоуглем и контроль без биоугля. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

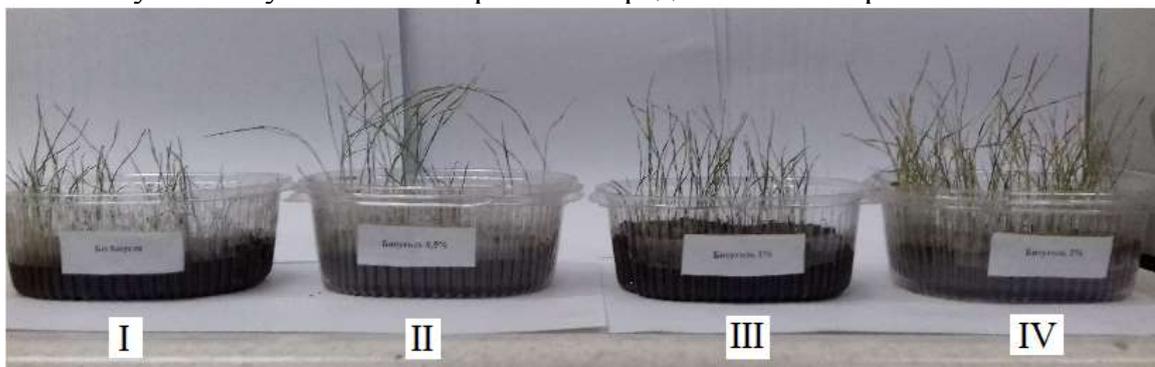


Рис. 6. Опыты с пшеницей. I- почва; II – смесь (почва+0,5% биоуголь); III - смесь (почва+1% биоуголь); IV - смесь (почва+2% биоуголь)



Как видно из рисунка 6 все образцы отличаются друг от друга энергией прорастания и всхожестью семян. В образце без биоугля после 20 суток останавливался рост пшеницы. В образце почвы с 2% содержанием биоугля наблюдался самый лучший результат роста пшеницы. Что говорит о том что, применением биоугля можно улучшить свойства почвы и ее плодородие.

Выводы

В работе получен биоуголь из рисовой шелухи с удельной поверхностью 292,5 м²/г и с суммарным объемом пор 0,125 см³/г. Показана эффективность очистки почвы загрязненной тяжелыми металлами как цинк и свинец. Установлено, что содержание в смеси почвы 2-ух % биоугля, снижает концентрацию цинка от 25,748 % до 18,972 % , свинца от 2,356 % до 0,356 % и улучшает среду для роста и развития пшеницы.

Полученные данные могут быть использованы для проведения природоохранных, рекультивационных мероприятий загрязненных почв в регионах воздействия выбросов горно-металлургических предприятий.

Литература

1. Токсикологическая химия: Учебник для вузов / Под ред. Т.В. Плетеневой. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2005. 512 с.
2. Садовникова Л.К., Орлов Д.С., Лозановская И.Н. Экология и орхана окружающей среды при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2006.335 с.
3. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: Космосинформ, 2001. 400 с.
4. Hemida S.K., Omar S.A., Abdel-Mallek A.Y. Microbial populations and enzyme activity in soil treated with heavy metals // *Water, Air and Soil Pollution*. 1997. Vol. 95, № 1-4. P. 13-22.
5. Радомская В.И., Моисеенко Н.В. Влияние осадков сточных вод на поведение тяжелых металлов в системе почва - растение // *Агрехимия*. 2006. № 11. С. 77-78.
6. S. J. Lehmann, *Biochar for Environmental Management*, Earthscan, Oxford, UK, 2009.
7. H. Aydın, Y. Buluta, and C. Yerlikayab, "Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents," *Journal of Environmental Management*, vol. 87, pp. 37–45, 2008.
8. M. Amutio, G. Lopez, J. Alvarez et al., "Flash pyrolysis of forestry residues from the Portuguese Central Inland Region within the framework of the BioREFINA-Ter project," *Bioresource Technology*, vol. 129, pp. 512–518, 2013.
9. ГОСТ 17.4.3.01-83.
10. ГОСТ 5180-75
11. ГОСТ Р ИСО 114 65-2011
12. S. Azat, Z. Mansurov, F. Kozybaeva, G. Beiseyeva, A. Murataliev. Land cover pollution from mining and metallurgical enterprises and biotechnological method of remediation using biochar // *Nanomedicine and nanoscience research* // Vol. 122, Issue 4. P.1-7.



УДК 631.459

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭРОДИРОВАННЫХ ПОЧВ

Глазунов Г.П., Шестакова М.В.

Россия, Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова

glazng@mail.ru

Мониторинг состояния почв и их комплексная оценка являются необходимым условием государственного управления устойчивым развитием. Согласно федеральному закону об охране окружающей среды мониторинг и оценка состояния почв осуществляются на основе контроля химических, физических и биологических свойств почв. В условиях цифровизации экономики возникает необходимость разработки высокопроизводительных экспресс-методов оценки состояния почв территории страны. В наибольшей степени требованиям к экспресс-методам отвечают некоторые методы измерения физических свойств почв. Данная работа посвящена обоснованию метода оценки состояния эродированных почв на основе сравнительного анализа закономерностей профильного распределения легко измеряемых свойств в эродированных почвах и в почве, выбранной в качестве местного эталона профиля не эродированной почвы. В качестве опорного показателя использовали органофиль неэродированной почвы. Его анализировали на основе оригинальной физически содержательной модели, созданной в рамках законов сохранения механики и закономерностей макроскопической химической и биохимической кинетики, с использованием представлений сплошной среды, теории подобия и анализа размерности. Решение этой модели, представляющей собой систему дифференциальных уравнений, полученное аналитически, было использовано в качестве центрирующей функции, описывающей органофиль неэродированной почвы. Параметризованная на основе экспериментального органофиля неэродированной почвы центрирующая функция была использована в качестве эталона при аналитическом определении величины смещения экспериментального органофиля вдоль абсциссы (глубины почвы). Критерием искомого положения на абсциссе отрезка экспериментальной функции, определенной по глубине разреза эродированной почвы, соответствующего максимально возможному совпадению значений экспериментальной и центрирующей функций, служил минимум суммы квадратов центральных отклонений этих функций. При этом смещение экспериментальной функции относительно положения центрирующей в глубь расценивали как следствие утраты поверхностного слоя почвы в результате смыва, размыва, сдувания или механического сдвига при обработках или строительстве, а смещение вверх расценивали как следствие погребения почвы наносами. Наряду с органофильем в качестве опорного показателя испытывали и профили удельного электрического сопротивления, измеренного на стенке разреза, и профили коэффициента яркости, найденного по цифровым фотографиям стенки разреза. Применение этих показателей дало результаты, совпадающие с результатами анализа органофиля в степени, достаточной для практического применения с целью определения толщины утраченного (или обретенного) в результате эрозионных процессов слоя почвы. Получаемые указанными методами параметры органофиля почвы-эталона позволяют не только определить толщину утраченного (обретенного) слоя, но и получить шкалу универсального показателя состояния почвы, разработанного ранее. Показатель состояния представляет собой теоретически выведенную функцию от функции отклика почвы на



воздействие, изменяющуюся от нуля (характеризует оптимальное состояние почвы) до единицы (характеризует максимально напряженное состояние почвы под воздействием изучаемого фактора негативного воздействия). Отображение функции отклика почвы (на дозированное воздействие стрессора в достаточно полном диапазоне его воздействий) на функцию показателя напряженности состояния почвы, определенную на том же диапазоне воздействий, открывает возможность количественной оценки качества почв, находящихся под воздействием различных стрессоров, в сопоставимых относительных единицах, а также и нормирования качества почв в рамках единого теоретически содержательного подхода. В работе приведены материалы профильного определения содержания гумуса, кажущегося электрического сопротивления почвы и коэффициента яркости почвы по цифровым фотографиям стенок разрезов, явным образом определены ограничения использованных моделей и обсуждены особенности их применения на эродированных серых лесных почвах и черноземах лесостепи.



УДК 631.45

ВЛИЯНИЕ ПРЕДСТОРИИ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ НА ИХ АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ

Горепекин И.В.¹, Исакова С.А.¹, Федотова М.Ф.¹, Федотов Г.Н.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
decembrist96@yandex.ru

THE INFLUENCE OF PREHISTORY AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS ON THEIR
ALLELOTOXICITY

Gorepekin I.V., Isakova S.A., Fedotova M.F., Fedotov G.N.
Lomonosov Moscow State University, Department of Soil Science, Moscow, Russia

Annotation: As a result of the research, the following conclusions were made: 1) different cultivars of spring wheat are inhibited by soils according to revealed regularity; 2) territories of agricultural use were characterized with a greater allelotoxicity compared with fallow and forest areas; 3) soil allelotoxicity assessment is obligatory even under the crop rotations.

В сельском хозяйстве хорошо известно явление почвоутомления, которое заключается в снижении плодородия почв. Особенно ярко данный феномен выражен при возделывании монокультур. В работах А.М. Гродзинского подчеркивается (Гродзинский и др., 1979), что в основе почвоутомления лежит накопление в почвах аллелопатических токсинов, источниками которых выступают выделения растений, микроорганизмов, а также вещества, образующиеся при разложении растительных остатков. Однако накопление аллелотоксинов происходит не только в почвах сельскохозяйственного назначения. Проведенное Н.А. Красильниковым исследование нескольких тысяч образцов подзолистых почв, незагрязненных поллютантами, показало, что практически все они обладали токсичностью не только по отношению к высшим растениям, но и к микроорганизмам (Красильников, 1958).

Несмотря на повсеместное распространение аллелопатического токсикоза почв, данное явление остается недостаточно изученным. Это связано с тем, что исследование химического состава почв не позволяет однозначно определять наличие токсикоза у почв и его величину. Поэтому основными способами изучения токсикоза почв являются методы биотестирования. В большинстве случаев изучают влияние вытяжек из почв на развитие семян или оценивают развитие в изучаемых почвах набора тест-культур. Это дает возможность получать информацию о токсикозе почв на качественном уровне и полуколичественном уровне. Однако было показано, что данные, получаемые на ранних этапах прорастания семян и развития из них растений, хорошо коррелируют с аллелотоксичностью почв, обуславливающих их плодородие и урожайность сельскохозяйственных растений (Лобков, 2017).

Целью работы являлось изучение влияния предистории и химических свойств почв на их аллелотоксичность.

Для оценки влияния аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур нами был разработан метод биотестирования, основанный на измерении суммарной длины проростков массива семян (Федотов и др., 2018). При работе с семенами, мы обратили внимание на то, что насыпной объем проросших семян (семян с проростками) намного превышает объем набухших семян, так как проростки семян, цепляясь друг за друга, создают



достаточно пористую структуру. Проведенные исследования ряда зерновых культур разных сортов показали, что разность между насыпными объемами в воде семян с проростками и набухших семян прямо пропорциональна общей длине проростков. В связи с использованием в одном опыте 1000–1200 семян удавалось минимизировать ошибку, связанную с разнокачественностью семян. В результате ошибка опыта не превышала 7% при 95%-ной доверительной вероятности.

Для оценки аллелотоксичности почв необходима «точка отсчета» или, иначе говоря, субстрат, который не содержит токсинов. Таким субстратом является отмытый речной песок. Замедление развития семян в почве по сравнению с песком можно выражать в % со знаком «минус». То есть, чем больше ингибирование, тем больше его значение (табл. 1).

Однако, существенным фактором, влияющим на скорость прорастания семян, является влажность почв. Очевидно, что при недостаточной влажности прорастание семян и развитие проростков будут замедляться из-за недостатка воды, а при избыточной влажности из-за недостатка кислорода. Поэтому сравнение субстратов, обладающих различным средством к влаге (песка и почв), может быть корректно только в точках, обеспечивающих оптимальные водно-воздушные условия и, соответственно, максимальную скорость развития в них семян.

Определение аллелотоксичности проводили для 12 субстратов и 6 сортов яровой пшеницы урожая 2018 года: «Лизы», «Агаты», «Любавы», «Златы», «Римы», «Эстер».

В работе использованы образцы почв как зонального ряда (дерново-подзолистые, серые лесные, черноземы, каштановые), так и одного типа (дерново-подзолистые), но имеющие различную предысторию: почвы под севооборотом (№1-4), залежная почва (№5), почва под монокультурой (картофелем с 2015 года №6), а также почвы, находящиеся под лесом (№7,8) (табл. 1). Мы предполагали, что такое разнообразие объектов позволит лучше понять причины возникновения аллелотоксичности почв.

Из полученных данных видно (табл. 1), что, во-первых, различные сорта яровой пшеницы ингибируются почвами однотипно. Во-вторых, аллелотоксичность почв в большей степени характерна для территорий сельскохозяйственного использования независимо от выращиваемых культур. Причём использование севооборота на изученных участках мало способствовало снижению их аллелотоксичности. Обращает на себя внимание, что наименьшая величина ингибирования среди 4-полей наблюдается для поля №1, где предшественником в севообороте выступала викоовсяная смесь.

Однако в соответствии с севооборотом пшеницу планируется высаживать после картофеля на поле №3, где значение ингибирования значительно выше для всех 6 сортов. Это позволяет предположить, что использование севооборотов без контроля аллелотоксичности конкретного поля не всегда может дать положительный результат.

В ходе экспериментов было подтверждено, что аллелотоксичность почв возрастает с глубиной, что полностью подтверждает литературные данные (Гродзинский и др., 1979; Лобков, 2017).

При изучении влияния химических свойств почв на аллелотоксичность были определены: рН (KCl), N, P₂O₅, K₂O, C, Ca, S (табл. 2). Однако корреляции между ингибированием и изученными химическими свойствами обнаружить не удалось.



Таблица 1. Ингибирование семян яровой пшеницы, определяемое по изменению суммарной длины проростков массива семян за 2 суток на почвах по сравнению с песком, %

| № почвы* | Предыстория | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Лиза" | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Агата" | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Любав а" | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Злата" | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Рима" | Ингибирование яровой пшеницы сорт "Эстер" |
|----------|--------------------|--|---|---|---|--|---|
| 1 | Вико-овсяная смесь | -5 | -24 | -32 | -34 | -37 | -56 |
| 2 | Горчица | -16 | -36 | -48 | -47 | -60 | -72 |
| 3 | Картофель | -20 | -37 | -57 | -55 | -61 | -76 |
| 4 | Ячмень | -21 | -34 | -53 | -51 | -61 | -80 |
| 5 | Залежь | 23 | 0 | 16 | 0 | 5 | -7 |
| 6 | Залежь | 0 | -19 | -1 | -17 | -5 | -19 |
| 7 | Картофель | 0 | -35 | -29 | -49 | -49 | -67 |
| 8 | Лес (подстилка) | 0 | -17 | 2 | -11 | 9 | 6 |
| 9 | Пшеница | -49 | -52 | -34 | -42 | -36 | -65 |
| 10 | Картофель | -16 | -34 | -42 | -41 | -45 | -65 |
| 11 | Пшеница | -42 | -69 | -76 | -85 | -86 | -94 |
| 12 | Залежь | -3 | -17 | -14 | -10 | -11 | -13 |

*Номерам почв соответствуют (по классификации почв 1977 года): 1-4 - Окультуренная дерново-подзолистая глубоко-подзолистая глубокопахотная легкосуглинистая на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциалом; 5 - Дерново-неглубокоподзолистая освоенная глубокопахотная легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых мореной; 6 - Дерново-неглубокоподзолистая освоенная глубокопахотная легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых мореной; 7 - Дерново-подзолистая освоенная глубокопахотная сильносымтая почва на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями; 8 - Глубокодерново-подзолистая слабодифференцированная (старопахотная) легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями; 9 - Агродерново-глубокоподзолистая супесчаная на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях, подстилаемая с глубины 92 см бескарбонатными лессовидными (покровными) суглинками; 10 - Чернозем типичный среднемощный среднесуглинистый на лессовидных суглинках; 11 - Серая лесная освоенная слабосымтая среднесуглинистая на лессовидных суглинках, подстилаемых мореной; 12- Каштановая среднемощная легкосуглинистая на элюво-делювиальных суглинках.

Таблица 2. Химические свойства исследованных в работе почв

| № почвы* | Ca, мг/100г | pH (KCl) | N,% | P ₂ O ₅ , мг/100г | K ₂ O, мг/100г | S,% | C,% |
|----------|-------------|----------|------|---|---------------------------|------|------|
| 1 | 208 | 6,2 | 0,29 | 31,5 | 36,95 | 0,09 | 3,33 |
| 2 | 216 | 6,3 | 0,35 | 32,5 | 25,9 | 0,10 | 3,91 |
| 3 | 167 | 5,9 | 0,23 | 31,5 | 29,8 | 0,07 | 2,57 |
| 4 | 117 | 6,1 | 0,20 | 31 | 22,05 | 0,06 | 2,23 |
| 5 | 83 | 5,5 | 0,17 | 14,5 | 6,48 | 0,05 | 1,82 |
| 6 | 67 | 5,1 | 0,04 | 3 | 3,25 | 0,02 | 0,26 |
| 7 | 67 | 5,1 | 0,17 | 17,5 | 7,15 | 0,04 | 1,71 |
| 8 | 117 | 3,6 | 1,18 | 6 | 11 | 0,39 | 35,1 |
| 9 | 133 | 6,6 | 0,14 | 29 | 19,45 | 0,05 | 1,65 |
| 10 | 316 | 5,3 | 0,24 | 4 | - | 0,08 | 3,58 |
| 11 | 100 | 5 | 0,12 | 18,5 | 15,55 | 0,05 | 1,07 |
| 12 | 150 | 6,2 | 0,09 | 5,5 | 11 | 0,05 | 0,8 |

*Номера почвы соответствуют легенде таблицы 1.



Выводы.

1. Прослеживается однотипность изменения ингибирования разных сортов яровой пшеницы.

2. Аллелотоксическое воздействие окультуренных почв на прорастание семян и развитие проростков яровой пшеницы выражено значительно сильнее по сравнению с почвами, не используемыми для возделывания культурных растений.

3. Полученные данные позволяют предположить, что применение севооборотов не всегда способно снизить почвоутомление. Это делает необходимым проведение оценки реального почвоутомления (аллелотоксичности почв) при применении севооборота.

Литература.

1. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И. (1979) Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка. 248 с.
2. Красильников Н.А. (1958) Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР. 464 с.
3. Лобков В.Т. (2017) Использование почвенно-биологического фактора в земледелии: монография / Лобков В.Т. – Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. 166 с.
4. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П., Горепекин И.В. (2018) Методика для оценки эффективности действия стимуляторов прорастания семян // Лесной вестник. Т. 22. №6. С. 95-101.



УДК. 631.445.41+541.6

ПРОТИВОЭРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА, ОБРАБОТАННОГО ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ГУМАТОВ КАЛИЯ

Демидов В.В.¹, Панова И.Г.², Шульга П.С.¹, Ильясов Л.О.², Ярославов А.А.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
igpan@mail.ru

²Химический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация
demidov951@yandex.ru

ANTI-EROSION PROPERTIES OF CHERNOZEM, TREATED WITH POLYELECTROLYTE COMPLEXES
BASED ON POTASSIUM HUMATE

Demidov V.V.¹, Panova I.G.², Shulga P.S.¹, Ilyasov L.O.², Yaroslavov A.A.²

¹Department of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Chemistry Department, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The influence of the anionic, neutral and cationic complexes of potassium humate/polycation on the aggregate composition and resistance to water erosion of chernozem was evaluated. The best soil builder is a positively charged complex, which prevents soil washing out at a water flow rate of 0.3 m/s.

Введение

Чернозем является одним из наиболее ценных мировых ресурсов, который может быть полностью потерян в результате эрозионных процессов. Негативным процессам подвержено более трети почв сельскохозяйственных угодий России. По черноземным областям ЦФО 34% площади пашни и 51% площади пастбищ эрозионно опасны, 18 и 15%, соответственно – дефляционно опасны. Ежегодный смыв с обрабатываемых земель составляет 0,56 млрд. т (Рыбальский, 2017). Наиболее разрушающим процессом, ведущим к потере и деградации плодородных почв, является водная эрозия. Формирование поверхностного стока приводит к отрыву и транспорту почвенных агрегатов водными потоками и, как следствие, дегумификации и потере почвы Быстрым и эффективным приемом улучшения структурного состояния и повышения противоэрозионных свойств пахотных почв является применение полимерных структурообразователей, в том числе полиэлектролитов (ПЭ) (Onyejekwe, 2015; Panova, 2017). Показано, что оптимальный результат может быть достигнут, если полимер содержит в себе как гидрофильные, так и гидрофобные участки. Первые взаимодействуют с гидрофильными областями на поверхности частиц почвы и склеивают их. Вторые вызывают тот же эффект в отношении гидрофобных участков частиц. Это приводит к резкому увеличению эффективности полимерного структурообразователя и его низкой растворимости в воде. Указанными свойствами обладают интерполиэлектролитные комплексы (ИПЭК), продукты взаимодействия двух разноименно заряженных полиэлектролитов. Стехиометрические ИПЭК, полученные на основе синтетических ПЭ и характеризующиеся полной компенсацией зарядов, являются эффективными связующими почвы, что было показано при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (Zezin, 2015).

Цель данной работы заключалась в оценке и сопоставлении в модельных экспериментах противоэрозионной стойкости частично деградированного чернозема, обработанного полимерными поликомплексами нового поколения. Такие ИПЭК получены с использованием



природных полианионов, гуматов калия (ГК), широко применяемых в качестве удобрений и иммуностимуляторов растений. В качестве второго компонента комплексов использован нетоксичный поликатион, флокулянт для очистки сточных вод, полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПДАДМАХ).

Объекты и методы

В качестве составляющих поликомплексов использованы поли (диаллилдиметиламмоний хлорид) с $M_w = 400-500$ кДа (Sigma-Aldrich, США) и гуматы калия (Humintech GmbH, Германия) с $M_w 9,9$ кДа. Образцы почвы были отобраны в верхнем десяти сантиметровом слое пахотного горизонта на Опытном поле ВНИИЗиЗПЭ в районе села Панино Медвенского района Курской области. На основании полевого описания почвенного горизонта определен тип почвы – чернозем типичный среднемощный слабосмытый легкосуглинистый на лёссовидных суглинках глубокопахотный (Haplic Chernozem (Aric Loamic) (Острикова, 2008; Егоров, 1977). Координаты разреза: $51^{\circ} 32' 32,2''$ с.ш.; $36^{\circ} 06' 35,9''$ в.д. Точность 3 метра. Высота над уровнем моря 232 м. Разрез расположен в средней части северного склона южной экспозиции, угол наклона земной поверхности $1,1^{\circ}$. Определение содержания гумуса в почве поводилось по Никитину с колориметрическим окончанием по Орлову-Гриндель (Амельянчик, 2001). Определения агрегатного состава почвы и количества водопрочных агрегатов в черноземе проводились по методу Н.И. Саввинова (Вадюнина, 1986). Количественная оценка противэрозионной стойкости почвы проводилась на среднем эрозионном лотке, оборудованном расходомером, баком-отстойником, источником воды и устройством для измерения расхода воды за единицу времени (скорости водного потока) и определения величины смыва почвы за известный промежуток времени при заданной скорости (Кузнецов, 1986).

Результаты и обсуждение

В работе использовали три вида интерполиэлектролитных комплексов: нестехиометрические, отрицательно или положительно заряженные ИПЭК, включающие трехкратный избыток ионизированных функциональных групп лиофилизующего ПЭ, а также стехиометрический комплекс, характеризующийся нулевым зарядом. Комплексы получали простым смешиванием 1% водных растворов высокомолекулярных соединений, состав смесей характеризовали соотношениями (Q) ионизированных при pH7 карбоксильных групп гуматов калия и аммонийных групп ПДАДМАХ: $Q (-)=[N^+] : [COO^-] = 0.3$; $Q (+)=[COO^-] : [N^+] = 0.3$ и $Q (0)=[COO^-] : [N^+] = 1$. Концентрация ИПЭК в дисперсиях/суспензии составляла 1%.

Для обработки были взяты образцы слабосмытого чернозема. Содержание гумуса – 4,96% Анализ агрегатного состава исходной почвы в воздушно-сухом состоянии, показал, что средневзвешенный диаметр агрегатов составил 2,5 мм. Средневзвешенный диаметр водостойких агрегатов чернозема составил 0,5 мм.

Для изучения состояния структуры и устойчивости к водной эрозии чернозема, обработанного ИПЭК, была использована практически не растертая почва, по своему состоянию приближающаяся к естественным условиям. Обработка почвы полимерами проводилась путем однократного разбрызгивания 1% водной дисперсии/суспензии ИПЭК на поверхность почвы из расчета 2 л/м^2 . При этом визуально было обнаружено, что при использованной технологии нанесения глубина проникновения водных растворов ИПЭК в почвенный слой не превышала 1 см. Образцы почвы сушили в течение 3-4 суток, конечная влажность составила около 7%.



На рис. 1 представлено массовое содержание фракций агрегатов разного размера в верхнем сантиметровом слое чернозема в воздушно-сухом состоянии до и после обработки полимерами. Следует отметить, что доля маленьких агрегатов 0,125-0,75 мм в обработанном черноземе снизилась на 25-30%. При этом содержание крупных агрегатов, > 10мм, наоборот, существенно повысилось. Соответствующая анализ показывает, что при сухом просеивании средневзвешенный диаметр агрегатов составил 4,7мм, 5,6мм и 5,5 мм, соответственно, при использовании комплексов состава Q(-), Q(0) и Q(+).

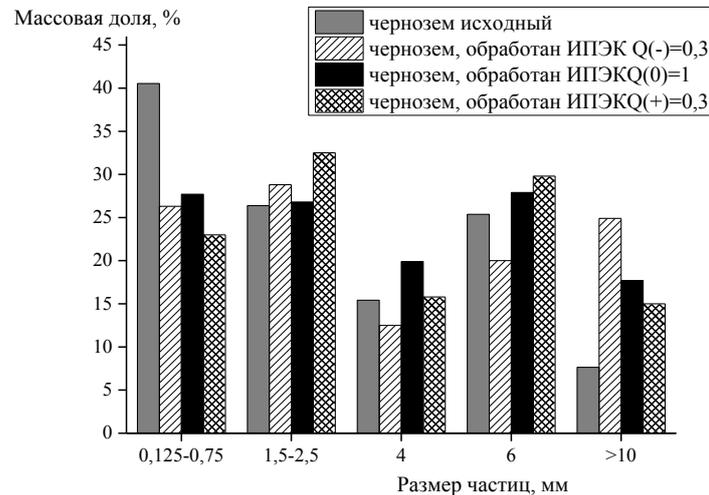


Рис.1. Влияние ИПЭК на агрегатный состав воздушно-сухого чернозема.

Массовые доли водостойких агрегатов чернозема до и после обработки полимерами представлены на рис.2.

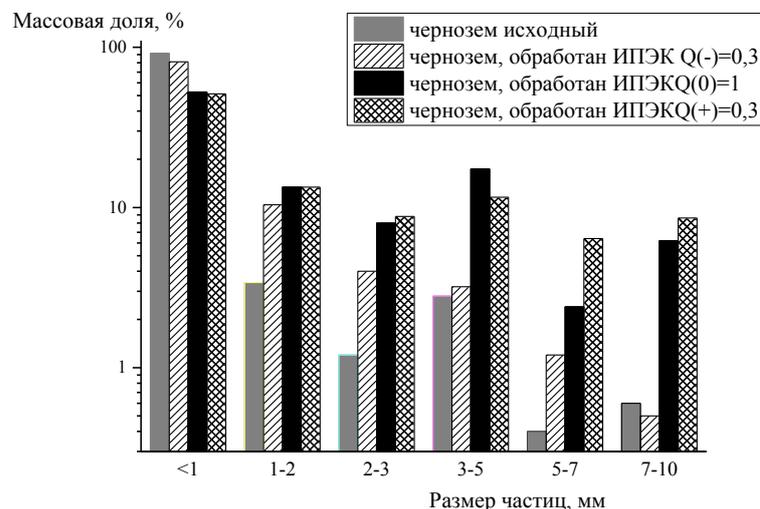


Рис.2. Влияние ИПЭК на количество водостойких агрегатов чернозема.

Видно, что и в этом случае обработка ИПЭК приводит к снижению содержания меньших по размеру водостойких агрегатов (<1 мм) и повышению содержания агрегатов большего размера. Математическая обработка показала, что средневзвешенный диаметр водостойких агрегатов составил 0,7 мм, 1,9 мм и 2,1 мм, соответственно, для комплексов состава Q(-), Q(0) и Q(+). Таким образом, использование поликомплексов позволяет существенно повысить



прочность и размер водостойких агрегатов чернозема, то есть улучшает структурное состояние почвы.

Результаты проведенных экспериментов по изучению устойчивости чернозема к водной эрозии до и после обработки полимерами представлены на рис. 3.

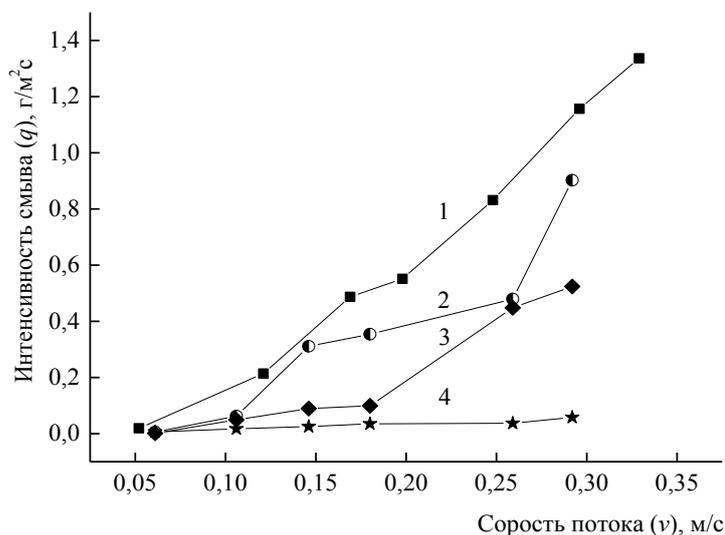


Рис.3. Зависимость интенсивности смыва почвы от скорости водного потока для исходного чернозема (1) и чернозема, обработанного ИПЭК: Q(-) (кривая 2), Q(0) (кривая 3) и Q(+) (кривая 4).

Видно, что в результате обработки слабосмытого чернозема полимерными препаратами происходит снижение интенсивности смыва чернозема. При этом, отрицательно заряженный ИПЭК проявил себя как достаточно слабый структурообразователь, способный несколько повысить устойчивость чернозема к водной эрозии только при небольшой скорости водного потока (0,12 м/с). Наиболее эффективным оказался положительно заряженный ИПЭК, практически полностью предотвращающий смыв почвы даже при скорости потока 0,3 м/с. Можно предположить, что в результате обработки почвы полимерами происходит слипание почвенных коллоидов, приводящее к увеличению ее агрегатного состава и меж-агрегатного сцепления. При этом прочность образующихся контактов существенно выше в случае положительно заряженного ИПЭК за счет его более эффективного связывания с отрицательно заряженными минеральными и органическими частицами, входящими в состав чернозема. Для отрыва и перемещения скрепленных таким образом почвенных агрегатов требуется большая скорость водного потока, т.е. происходит увеличение противоэрозионной стойкости почвы.

Выводы

Показано, что обработка слабосмытого чернозема интерполиэлектrolитными комплексами (ИПЭК) на основе гуматов калия и поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) улучшает структурное состояние чернозема. При использовании всех трех ИПЭК, отрицательно заряженного, нейтрального и положительно заряженного, происходит увеличение среднего диаметра воздушно сухих почвенных агрегатов в 2 раза. Средний диаметр образующихся водостойких агрегатов зависит от заряда ИПЭК и составляет 0,7 мм, 1,9мм, 2,1мм, соответственно, для комплексов состава Q (-)/Q (0)/Q (+), что в 1,4/3,8/4,2 раза больше исходного среднего диаметра водопрочных агрегатов чернозема (0,5 мм).



Наибольшим противозэрозийным эффектом обладает положительно заряженный ИПЭК, предотвращающий смыв почвы при скорости водного потока 0,3 м/с.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (грант № 18-29-25017).

Литература

- Н.Г. Рыбальский (2017). Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». М.: Минприроды России; НИА-Природа, 760
- Onyejekwe, S., & Ghataora, G. S. (2015). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 651-665. DOI: 10.1007/s10064-014-0667-8
- Panova, I. G., Sybachin, A. V., Spiridonov, V. V., Kydraliev, K., Jorobekova, S., Zezin, A. B., & Yaroslavov, A. A. (2017). Non-stoichiometric interpolyelectrolyte complexes: Promising candidates for protection of soils. *Geoderma*, 307, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.001>.
- Zezin, A. B., Mikheikin, S. V., Rogacheva, V. B., Zansokhova, M. F., Sybachin, A. V., & Yaroslavov, A. A. (2015). Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion. *Advances in colloid and interface science*, 226, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.06.006>
- Полевой определитель почв России (2008). Под ред. К.Т. Остриковой. М.: изд-во Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 182 с.
- Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. и др. (1977). Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 224 с.
- Амельянчик О.А., Большеева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Минеев В.Г., Прижукова В.Г., Сычев В.Г. (2001). Практикум по агрохимии. Учеб. пособие, - 2-е изд., перераб. и доп. Под ред. акад. РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986). Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 416 с.
- Кузнецов М.С., Глазунов Г.П., Григорьев В.Я. (1986). Методы изучения эрозийных процессов. М.: Изд-во МГУ. 104 с.



УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ ТИПИЧНЫХ ЗНАМЕНСКОГО РАЙОНА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПЕРЕПОЛИВОВ ИХ НАВОЗНЫМИ СТОКАМИ

Красин В.Н. Никифорова А.С. Степанцова Л.В. Печуркини А.С.
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, РФ
krasin84@yandex.ru

CHANGE OF QUALITY COMPOSITION OF ORGANIC SUBSTANCE IN CHERNOZEMS OF TYPICAL
ZNAMENSKY DISTRICT OF THE TAMBOV REGION UNDER THE INFLUENCE OF EXPLOSIONS BY
THEIR DRAINS

Krasin V.N. Nikiforova A.S. Stepantsova L.V. Pechurkini A.S.
FSBEI HE Michurinsk SAU, Michurinsk, RF

Annotation: watering chernozem with high norms of manure drains leads to profound changes in the qualitative composition of organic matter, which do not disappear after 1-2 seasons: the proportion of fraction I increases, fulvic acids are washed out, and the optical density of humic acids of fraction I and II increases.

Введение

В последние десятилетия установлено, что органическое вещество черноземов обладает низкой устойчивостью к переувлажнению (Ачканов, 1999; Безуглова, 1998; Воробьева, 2002). В частности, избыточное увлажнение приводит к увеличению доли фульвокислот и бурых гуминовых кислот (Воробьева, 2002; Зейдельман, 2012; Зейдельман, 2013). Косвенно оценить содержание той или иной фракции гумусовых кислот можно по оптической плотности вытяжки. На основании этого для оценки водного режима черноземовидных почв севера Тамбовской низменности был предложен критерий, основанный на соотношении оптических плотностей щелочной и щелочной пирофосфотной вытяжек, извлекающих соответственно I и I и II фракции гуминовых кислот – K_{I-II} (Зейдельман, 2012; Орлов, 2004). Саму оптическую плотность гуминовых кислот используют в качестве дополнительного показателя гумусного состояния почв, который отражает строение молекул гуминовых кислот (Орлов, 2004). С. Безуглова и Назаренко (Безуглова, 1998). предполагают, что увеличение оптической плотности гуминовых кислот мочаристой почвы свидетельствует о росте доли алифатических структур в их молекулах.

Сильное антропогенное влияние на органическое вещество черноземов оказывает полив навозными стоками в теплое время года. В условиях избыточной влажности и большого количества органического вещества процессы оглеения протекают весьма интенсивно. Дегградация структуры из зернистой в призматическую или пылеватую за 1-2 сезона свидетельствует о значительном изменении качественного состава органического вещества.

Объекты и методы

Цель работы: обосновать использование оптической плотности различных вытяжек из гумусовых горизонтов для диагностики агроэкологического состояния черноземных почв и разработать показатели для оценки степени дегградации гумуса.

Исследования проводились в Знаменском, районе области на типичном черноземе. Фракционного состава гумуса определяли по Кононовой и Бельчиковой (Минеев, 2001), обрабатывая почву последовательно щелочной и щелочной пирофосфатной вытяжками.



Дополнительно определяли оптическую плотность каждой вытяжки и коэффициент степени гидроморфизма черноземов (Степанцова, 2011). В качестве диагностических критериев были выбраны следующие показатели: 1) коэффициент степени гидроморфизма; 2) модифицированный коэффициент степени гидроморфизма; 3) Оптическая плотность щелочной и щелочной пирофосфатной вытяжек; 4) соотношение оптических плотностей одной и той же вытяжки при длине волны 340 и 440 нм.; 5) % от общего содержание органического вещества I и II фракции.

Результаты

Отношение оптических плотностей одной и той же вытяжки при длине волны 340 и 440 нм («наклон кривой оптической плотности») несет в себе информацию о доли фульво и гуминовых кислот в вытяжке. Максимальная оптическая плотность как гуминовых, так и фульвокислот наблюдается при длине волны -340 нм, но при длине волны 440 нм оптическая плотность фульвокислот уменьшается более чем в 6 раз, в то время как гуминовых только в 2 раза.

Контролем в наших исследованиях послужил неорошаемый чернозем типичный – почва характерная для юга Тамбовской области. Почва характеризуется высоким плодородием, отличной зернистой структурой. Содержание органического вещества в почве составляет 3,3-3,5%, доля I фракции - 10-12% от общего содержания органического вещества почвы, ее оптическая плотность 0,09-0,1, наклон кривой оптической плотности 3-3,3, содержания фульвокислот I фракции - 60 %. Доля II фракции – 35-40%, ее оптическая плотность – 0,20-0,22. Наклон кривой оптической плотности – 2,2-2,3 – фульвокислоты составляют около трети от общего содержания органического вещества этой фракции.

Можно выделить 4 стадии в процессе восстановления черноземов после переполивов их навозными стоками. I стадия – наблюдается на полях, где только что проводился полив и еще повсеместно разлиты навозные стоки. Высокое содержание аммония способствует подщелачиванию почвы. Активно идут процессы брожения. Растения или отсутствуют, или сильно угнетены. На этой стадии общее содержание органического вещества в почве, пропитанной навозными стоками выше, чем в типичном черноземе. Доля I фракции увеличиваются на 10%, возрастает и ее оптическая плотность. Это, по-видимому, обусловлено поступлением в нее органического вещества навозных стоков. За счет инфильтрации начинается вынос фульвокислот в нижние горизонты, так как «наклон кривой оптической плотности» с 3 снижается до 2. Все показатели II фракции практически не меняются по сравнению с типичным черноземом. Так как именно II фракция отвечает за структуру, на этой стадии почва сохраняет зернистую структуру, только местами образуются глыбистые отдельности. Незначительная степень деградации органического вещества практически не влияет на значения простого и модифицированных критериев степени гидроморфизма черноземов.

II стадию мы выделяли на полях, где полив закончился от 2-3 недель до 1,5 месяцев. Большая часть навозных стоков впиталась, только местами встречаются лужи навозных стоков. Это наиболее токсичная стадия. Из-за высокого содержания солей в почве вся растительность полностью гибнет. Структура почвы из зернистой деградировала в призматическую или слитую. Это и стадия максимальной деградации органического вещества почвы. Общее содержание органического вещества на этой стадии немного уменьшается по сравнению с I стадией. Более половины гумусовых кислот переходит в щелочную вытяжку (I фракция). При этом оптическая плотность очень высокая – 0,29 – Кривая оптической плотности практически выполаживается (отношение $D_{340}:D_{440}$ – равно 1).



Такое возможно если из почвы удалены не только фульвокислоты, но и функциональные группы гуминовых кислот. Условно говоря на месте остается только ароматическое ядро. Очень сильно изменятся и II фракция – возрастает ее оптическая плотность, наклон кривой оптической плотности снижается до 1,5-1,6. Критерии гидроморфизма черноземов существенно возрастают, отражая сложившуюся ситуацию.

Таблица 1. Показатели состава органического вещества черноземов и оптической плотности гумусовых кислот на разных стадиях восстановления

| C _{орг} , % | C _{ГК+ФК I} | | C _{ГК+ФК II} | | | | K _{I-II} x C _{орг} | Приз-наки деградации гумуса | Степень деграда- ции гумуса | |
|--|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|--|-----------------------------------|---|---------|
| | % от ΣC _{ГК} | D ₄₄₀ 0,001% C | D340 D440 | % от ΣC _{ГК} | D ₄₄₀ 0,001% C | D340 D440 | | | | |
| Чернозем типичный без поливов навозными стоками (контроль) | | | | | | | | | | |
| 3,4 ±0,1 | 12 ± 2 | 0,09 ± 0,01 | 3,0- 3,3 | 37 ± 4 | 0,21 ± 0,02 | 2,0- 2,3 | 0,63 - 1,25 | 2,5 - 5,0 | нет | нет |
| I стадия - начало разложения - 2-3 недели после внесения навозных стоков | | | | | | | | | | |
| 4,1 ± 0,2 | 22 ± 3 | 0,23± 0,01 | 2,0- 2,3 | 35 ± 6 | 0,22 ± 0,05 | 2,1- 2,3 | 0,95- 1,30 | 3,3- 6,5 | увеличение доли I фракции | слабая |
| II стадия - до 1,5 месяцев после внесения навозных стоков | | | | | | | | | | |
| 3,85 ± 0,25 | 32 ± 4 | 0,29± 0,02 | 1,05- 1,25 | 29 ± 7 | 0,24 ± 0,04 | 1,6 - 1,7 | 3,10- 3,30 | 11- 16 | Вымывание ФК I и II фракции | сильная |
| III стадия - от 2-3 до 6 месяцев после внесения навозных стоков | | | | | | | | | | |
| 3,02 ± 0,15 | 24 ± 4 | 0,28± 0,02 | 1,45- 1,85 | 41 ± 3 | 0,26± 0,04 | 1,5 - 1,6 | 1,00- 50 | 4,0- 7,0 | начало стабилизации I фракции | Сильная |
| IV стадия - следующий год после внесения навозных стоков | | | | | | | | | | |
| 3,20 ± 0,15 | 18 ± 4 | 0,18± 0,02 | 1,25- 1,45 | 33 ± 3 | 0,25± 0,04 | 1,5 - 1,6 | 2,05- 2,40 | 6,0- 9,0 | полная стабилизации I фракции, II – не восстановилась | Средняя |

III стадия – стадия восстановления. Она наступает тогда, когда общее содержание солей в почве высоко, но уже не токсично для растений. Поля покрывает высокая в человеческий рост сорная растительность. На этой стадии происходит разложение свежего органического вещества, об этом свидетельствует уменьшение его общего содержания в почве. Разрушение органического вещества происходит за счет I фракции, ее содержание уменьшается. По сравнению с предыдущей стадией, наклон кривой оптической плотности возрастает с 1,0 до 1.25-1,45, что может свидетельствовать о начавшемся восстановлении I фракции. Все показатели II фракции не меняются. Не улучшается и структурное состояние почвы, она или глыбистая, или пылеватая, после обработки. Начавшееся восстановление сопровождается небольшим снижением показателей степени гидроморфизма черноземов по сравнению с предыдущей стадией.

IV стадию мы выделяем, когда агрохимические показатели почвы опускаются до уровня нормальных для данной почвы. На этой стадии соотношение между I и II фракцией восстанавливается до уровня типичного чернозема. Но не восстанавливаются нормальные



значения оптических плотностей и наклон кривых оптических плотностей что свидетельствует о том, что за 1-2 сезона гумусное состояние черноземов после переполивов их навозными стоками не восстанавливается.

Выводы

1. Полив черноземов высокими нормами навозных стоков (переполив) ведет к глубоким качественным изменениям в составе органического вещества, которые не исчезают в течении 1-2 лет.

2. Сочетание избыточного увлажнения и высоких доз свежего органического материала способствует развитию глееобразования, который ведет к вымыванию фульвокислот, разрушается II фракция гуминовых кислот, увеличивается оптическая плотность гуминовых кислот.

3. Деградация органического вещества сопровождается разрушением структуры черноземов.

Благодарность

Исследования проводились на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ.

Литература

1. Ачканов С.А. Николаева С.А. Вторичный гидроморфизм почв степных ландшафтов Западного Предкавказья // Почвоведение, 1999. №12. С. 1424-1432.

2. Безуглова О.С. Назаренко О.Г. Генезис и свойства мочаристых почв Предкавказья // Почвоведение, 1998. № 12. С. 1423-1430.

3. Воробьева Л.А., Герасименко Н.М., Хитров Н.Б. Влияние переувлажнения на природу щелочности обыкновенных черноземов и лугово-черноземных почв Ростовской области // Почвоведение, 2002. № 4. С.431-442.

4. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. Методы количественной диагностики степени гидроморфизма черноземовидных почв севера Тамбовской равнины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение, 2012, № 1

5. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б.; Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения, способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013 – 352с.

6. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение, 2004, №8, с. 918-926

7. Практикум по агрохимии. Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689с.

8. Степанцова Л.В., Красин В.Н. Количественный показатель глубины залегания грунтовых вод в черноземовидных почвах севера Тамбовской равнины // Вестник Мич ГАУ. Мичуринск, 2011. № 2: С. 106-110.



УДК 550.4

МЕЛИОРАНТЫ ВЕРМИКУЛИТ-ЛИЗАРДИТОВОГО СОСТАВА ИЗ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Кременецкая И.П., Терещенко С.В., Алексеева С.А., Мосендз И.А., Слуковская М.В., Иванова Л.А.,
Михайлова И.В.

ФИЦ Кольский научный центр РАН, г. Апатиты Мурманской обл., Россия,
kremen@chemy.kolasc.net.ru

Abstract. The properties of the products of phlogopite mining waste after beneficiation (Kovdor, Murmansk region, Russia) are studied from the point of view of their use as components of soil constructions. With the help of the gravitational beneficiation scheme for waste, granular and sludge products with lizardite and vermiculite content of about 30% and “tails” were obtained. The mineral and chemical composition of vermiculite-lizardite products, as well as the results of plant testing, allow them to be used as an ameliorative and alkalizing material on soils of agricultural and industrial areas. The different fractional composition of the products allows using them to adjust the hydro-physical properties of soil constructions.

Введение

К неблагоприятным последствиям разработки месторождений относят нарушение естественных ландшафтов вследствие перемещения больших объемов вскрышных пород, отчуждение территории под их складирование, загрязнение прилегающих водных и почвенных объектов в результате пыления дезинтегрированной горной массы. Вскрышные породы могут быть утилизированы, если их состав позволяет предложить способ эффективного применения в народном хозяйстве. В настоящей работе рассмотрена возможность использования продуктов обогащения отходов добычи флогопита, содержащих минералы вермикулит и серпентин, в качестве компонентов почвенных конструкций. Предназначением мелиорантов является улучшение, кондиционирование деградированной, в том числе загрязненной, почвы. Продукты, содержащие вермикулит и серпентиновый минерал лизардит (в виде сунгулита), могут быть использованы для мелиоративных целей благодаря таким свойствам основных минеральных компонентов (вермикулита и лизардита), как способность вступать во взаимодействие с кислыми растворами, сорбировать Cu, Ni и другие металлы (Slukovskaya, 2019; Федотова, 2017), увеличивать содержание доступных для растений Mg и Si (Mikhaylova, 2018).

Объекты и методы

Объектом исследования являлись вермикулит-лизардитовые отходы добычи флогопита (г. Ковдор, Мурманская обл.). Разработанная в Горном институте гравитационная схема обогащения вермикулит-лизардитового сырья включает в себя гидравлическую классификацию, винтовую сепарацию и концентрацию на столах. Для получения термоактивированного материала зернистый вермикулит-лизардитовый продукт (ВЛП) обработан при температуре 700 °С в электрической модульно-спусковой печи конструкции А.И. Нижегородова (Иркутский национальный исследовательский университет) (Нижегородов, 2014; Нижегородов, 2014а). Печь изготовлена в ООО «Центр экспериментальной отработки инноваций», смонтирована и запущена в работу в экспериментальном цехе ИХТРЭМС КНЦ РАН под руководством директора Центра А.В. Звездина. Обжиг выполнен с целью получения материала, содержащего вспученный вермикулит (широко применяется в агротехнике).

Кислотонейтрализующую способность ВЛП (В, мг-экв/г) оценивали по методике, разработанной ранее для определения активности термоактивированных серпентиновых



минералов (Кременецкая и др., 2008). Методика основана на ацидиметрическом титровании образцов, которые помещали в раствор HCl (0.02 мг-экв/л), перемешивали в течение 3 ч., затем выдерживали без перемешивания. Суммарная продолжительность взаимодействия - 24 ч. Поскольку на процесс взаимодействия порошков с раствором кислоты оказывает влияние крупность частиц, динамику изменения состояния системы наблюдали в течение 30 суток. Суспензию фильтровали через фильтр «синяя лента», оставшуюся в растворе кислоту оттитровывали раствором Na₂CO₃ (0.01 мг-экв/г).

Фитотестирование проводилось в условиях краткосрочного (9 дней) лабораторного эксперимента с использованием планшетных тест-систем (Лисовицкая, Терехова, 2010) и семян стандартных тест-культур - кресс-салата и горчицы, а также декоративного газонного злака овсяницы красной. В контрольном варианте семена контактировали с дистиллированной водой, в опытном – с водной вытяжкой из шламового продукта, полученной при соотношении 20 г материала на 100 мл воды. В качестве показателей токсичности определяли всхожесть семян, энергию и дружность прорастания семян, длину первичного корня.

Обсуждение результатов

Вермикулит-лизардитовые продукты (ВЛП) получены по гравитационной схеме переработки отходов добычи флогопита. Исходный материал разделен на три продукта: зернистый, шламовый и некондиционный (в практике обогащения т.н. «хвосты»). Общий вид продуктов представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Общий вид конечных продуктов обогащения, увеличение 15^х: а – зернистый продукт; б – шламовый продукт; в - «хвосты»

Балансовое распределение основных минералов в продуктах обогащения приведено в таблице 1.

Зернистый продукт представляет собой материал крупностью -2 мм, преимущественно белого цвета (цвет лизардита). Содержание лизардита и вермикулита составляет 31 и 33% при извлечении 52 и 60% соответственно (табл. 1). В продукте присутствует около 36% примесей, среди которых преобладают частицы оливин-пироксеновых пород и пород типа мелкокристаллических фенитов или сиенитов, а также частицы минералов – диоксида, кварца, полевого шпата. Выход данного продукта составил 34.4%.

Шламовый продукт представляет собой мелкозернистый материал крупностью -0.3 мм. Содержание лизардита и вермикулита примерно одинаковое - около 30%. Вермикулит не содержит пачек и представлен мелкими тонкими листочками. Выход шламового продукта - 22% при примерно одинаковом извлечении лизардита и вермикулита (около 32-35%).



Некондиционный продукт («хвосты») содержит малое количество лизардита и вермикулита (7 и 2%) и не представляет интереса в качестве субстрата для изменения состава почвы, но может быть использован для корректировки гидрофизических свойств.

Таблица 1. Показатели гравитационного обогащения отходов, %

| Продукт | Выход | Содержание минералов | | | Извлечение минералов | | |
|-------------------|-------|----------------------|------------|--------|----------------------|------------|--------|
| | | Лизардит | Вермикулит | Прочие | Лизардит | Вермикулит | Прочие |
| Зернистый продукт | 34.4 | 31 | 33 | 36 | 52.5 | 60.3 | 20.3 |
| Шламовый продукт | 22.2 | 30 | 30 | 40 | 32.5 | 35.1 | 14.5 |
| «Хвосты» | 43.6 | 7 | 2 | 91 | 15.8 | 4.6 | 65.2 |
| Итого | 100.0 | 20 | 19 | 61 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

Данные по гранулометрическому составу ВЛП представлены на рисунке 2. Линейный характер кумулятивной зависимости для зернистого продукта (рисунок 2а) указывает на равномерность распределения частиц по размерам. По сравнению с зернистым, шламовый и некондиционный продукты характеризуются более высоким содержанием мелких частиц. Анализ дифференциальных кривых для гранулометрического состава (рис. 2б) показывает, что в шламовом продукте доминируют пылеватые частицы с размером менее 0.05 мм, а в некондиционном - тонкий песок (0.05-0.25 мм).

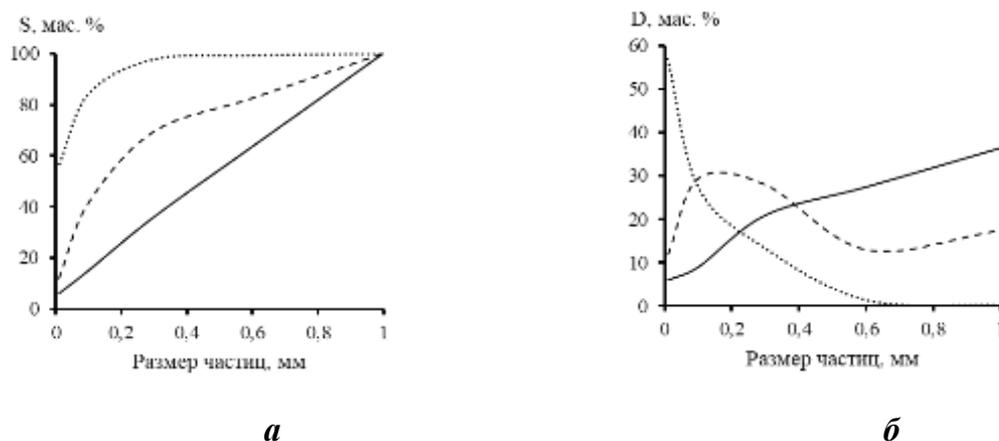


Рис. 2. Интегральные (а) и дифференциальные (б) кривые гранулометрического состава зернистого (—), шламового (.....) и некондиционного продуктов (- - - -)

Наименьшая влажность (НВ) шламового и зернистого продуктов практически одинакова и составляет величину 43-45% (табл. 2). Обжиг в 2 раза увеличивает данный показатель для зернистого термообработанного образца за счет наличия в нем вспученного вермикулита. Химический состав ВЛП представлен в табл. 2. Основными компонентами ВЛП являются Mg и Si с содержанием 24-42%, а также железо и кальций (4-14%). В качестве микрокомпонентов присутствуют Ti, Mn, Ni. Судя по результатам химического анализа, в ВЛП присутствуют карбонаты, содержание CO₂ составляет величину порядка 3.8-4.8%.



Карбонаты относятся к минералам, наименее стойкими по отношению к кислым растворам. Известным свойством серпентиновых минералов, к которым относится лизардит, также является способность взаимодействовать с кислыми растворами. Результаты определения кислотонейтрализующей способности образцов представлены на рисунке 3.

Таблица 2. Свойства вермикулит-лизардитовых продуктов

| Характеристики | Шламовый продукт | Зернистый продукт | Зернистый продукт, прокаленный при 700 °С |
|----------------------------------|------------------|-------------------|---|
| Содержание компонентов, % | | | |
| SiO ₂ | 39.94 | 41.96 | 42.37 |
| MgO | 27.69 | 24.45 | 24.75 |
| Al ₂ O ₃ | 0.38 | 3.25 | 4.20 |
| Fe ₂ O ₃ | 14.18 | 8.81 | 8.46 |
| CaO | 4.58 | 5.96 | 6.44 |
| TiO ₂ | 0.15 | 0.20 | 0.36 |
| MnO | 0.49 | 0.38 | 0.20 |
| NiO | 0.25 | 0.21 | 0.14 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.00 | 0.05 | 0.05 |
| S | 0.05 | 0.03 | 0.01 |
| CO ₂ | 3.81 | 4.77 | 4.03 |
| H ₂ O | 8.31 | 9.40 | 8.26 |
| Физико-химические характеристики | | | |
| В max, мг-экв/г | 15.48 | 14.35 | 14.68 |
| В max / В 20, % | 86 | 71 | 78 |
| НВ, мас. % | 45 | 43 | 90 |

Полученные данные свидетельствуют о том, что все ВЛП взаимодействуют с раствором кислоты, причем реакция идет медленно, равновесие достигается в течение 20-30 суток. Исходный зернистый продукт является менее активным по сравнению с двумя другими продуктами. Сравнительно высокая активность шламового продукта обусловлена его высокой дисперсностью. Более интенсивное высвобождение щелочного потенциала термоактивированным зернистым продуктом может быть обусловлено как частичной аморфизацией лизардита, так и дегидроксилированием поверхности вермикулита.

Теоретически возможное, максимальное значение В можно оценить по содержанию оксида магния. Расчетные данные представлены в таблице 2. Наиболее высокая степень



взаимодействия щелочных компонентов с кислотой (86%) зафиксирована для мелкодисперсного шламового продукта, с увеличением крупности частиц данный показатель снижается и составляет 71% для исходного зернистого продукта. Термоактивация зернистого продукта приводит к закономерному увеличению (до 78%) степени взаимодействия.

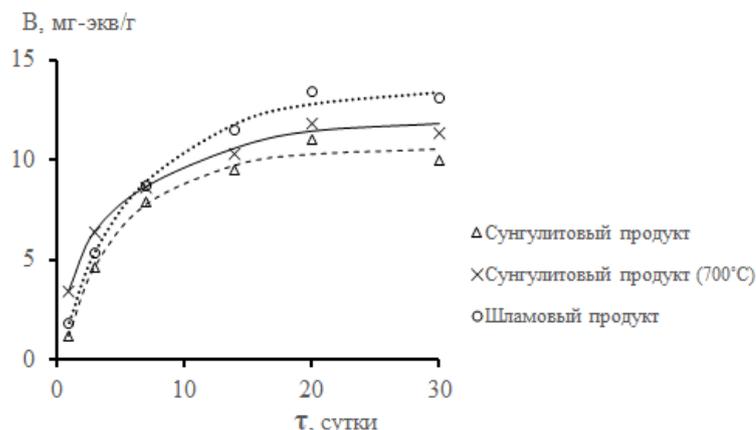


Рис. 3 Результаты определения кислотонейтрализующей способности B (мг-экв/г) образцов в зависимости от продолжительности взаимодействия τ (сутки)

Выполнено фитотестирование шламового продукта, который характеризуется высоким содержанием мелкодисперсной фракции.

Таблица 3 – Результаты фитотестирования шламового продукта

| Показатель | Тест-культура | Контроль | Опыт | Эффект |
|-------------------------------|------------------|----------|---------|--------|
| Энергия прорастания, % | Кресс-салат | 32 | 44 | +12 |
| | Горчица | 14 | 18 | +4 |
| | Овсяница красная | 32 | 44 | +12 |
| Дружность прорастания, шт/сут | Кресс-салат | 8,4 | 9,3 | +0,9 |
| | Горчица | 3,8 | 5,1 | +1,3 |
| | Овсяница красная | 8,9 | 9,6 | +0,7 |
| Лабораторная всхожесть, % | Кресс-салат | 76 | 84 | +8 |
| | Горчица | 34 | 46 | +12 |
| | Овсяница красная | 80 | 86 | +6 |
| Длина корней, см | Кресс-салат | 3.2±2.0 | 7.7±4.8 | * |
| | Горчица | 2.3±1.6 | 2.6±1.9 | |
| | Овсяница красная | 4.2±1.9 | 5.4±1.6 | |

Примечание - * статистически значимых отличий между контрольным и опытным вариантом не установлено, наблюдается положительная тенденция.

Наблюдения показали, что водная вытяжка из шламового продукта ускоряет появление как первых, так и массовых всходов, семена всех использованных культур проросли в опытных вариантах на сутки раньше по сравнению с контролем. Результаты фитотестирования шламового продукта свидетельствуют о благоприятном воздействии его компонентов на первых этапах роста и развития растений. В опытном варианте увеличилась всхожесть, энергия и дружность прорастания семян. По такому показателю, как длина корней, статистически значимых отличий между контрольным и опытным вариантом не установлено, однако наблюдается положительная тенденция увеличения данного показателя в опыте с водной вытяжкой шламового продукта по сравнению с дистиллированной водой.



Выводы

1. Минеральный состав продуктов обогащения вермикулит-лизардитовых отходов позволяет использовать их для улучшения качества почвы. Результаты фитотестирования шламового продукта подтвердили гипотезу о положительном воздействии материалов вермикулит-лизардитового состава на рост и развитие растений.

2. Фракционный состав шламового, зернистого и некондиционного продуктов отличается по содержанию пылеватых частиц и мелкого песка. Полученные продукты могут быть использованы для корректировки гидрофизических свойств почвенных конструкций, причем выбор продукта и его количество будет зависеть от текстуры основного материала.

3. Продукты вермикулит-лизардитового состава способны взаимодействовать с кислыми растворами, при этом наблюдается медленное, в течение 20-30 дней, высвобождение щелочного потенциала. Полученные материалы могут быть использованы для снижения кислотности почв сельскохозяйственного назначения, а также для реабилитации закисленных природно-антропогенных ландшафтов.

Литература

Slukovskaya M., Kremenetskaya I., Drogobuzhskaya S., Ivanova L., Mosendz I., Novikov A. Serpentine mining wastes – materials for soil rehabilitation in Cu-Ni polluted wastelands // *Soil Science*, 2018. V. 183. P. 141-149.

Федотова Е.В., Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В. Формы осаждения меди и никеля сунгулитом и термовермикулитом // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. №5 (8). Химия и материаловедение, вып. 1. С. 212-218.

Mikhaylova I., Slukovskaya M., Mosendz I., Kremenetskaya I., Karavayeva E., Drogobuzhskaya S. Application of Silicon-Contained Mining Wastes in Urban Greening // In book: *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. P. 145-152.

Нижегородов А.И. Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига // *Огнеупоры и техническая керамика*, 2014. № 9. С. 27-34.

Нижегородов А.И. Развитие концепции энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулитовых концентратов на базе электрических модульно-спусковых печей // *Огнеупоры и техническая керамика*, 2014а. № 1-2. С. 36-44.

Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2008. №4. С. 33-40.

Лисовицкая О.В., Терехова В.А. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения // *Доклады по экологическому почвоведению*. 2010, №1, вып. 13. С. 1-18



УДК631.44

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОСУШЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ДРЕНАЖА*

Ковалев И.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

kovalevmsu@mail.ru

EVALUATION OF THE FEASIBILITY OF DRYING MINERAL HYDROMORPHIC SOILS AND MODERN
TECHNOLOGY DRAINAGE

Kovalev I.V.

Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Moscow, Russia

Annotation: The water regime determines the signs of hydromorphic soils. Main features of water regime of light grey forest soils displaying different gleyization rate in years with different moistening were studied. Two layers of surface water appear in gleyish soils in spring and fall, hence, the yields decrease or crops die. Drainage is shown to eliminate surface water. Ceramic trench and plastic nontrench drainage exert similar agroecological and hydrological effects on the soils under examination. The estimation of diagnostic criterion – of the bogging index on drained soils.

Введение

Целесообразность осушения минеральных гидроморфных почв должна базироваться на анализе водного режима и продуктивности непрерывных рядов почв (обычно от водоразделов до низин). На основе таких данных в результате многолетних стационарных исследований выделяют виды почв по степени оглеения, например, для серых лесных почв (Зайдельман, Ковалева, 1994), для которых разработана диагностика, в том числе, основанная на морфологических и химических свойствах почв. Аналитическая оценка степени гидроморфизма почв апробирована в конкрециях по коэффициенту заболоченности – отношению содержания подвижного железа к марганцу. Система диагностических признаков для каждой группы почв, образующих непрерывный ряд, позволяет оценить выбор способа осушения и вид дренажа. Практически повсеместно в последние годы в практике осушения почв разных регионов применяется пластмассовый дренаж. Однако, сведения о его эффективности по сравнению с другими видами дренажа, длительном воздействии на эволюцию и функционирование почв, а также на развитие ландшафтов, весьма ограничены или отсутствуют вовсе.

Объекты и методы

Исследования проведены в Ступинском районе Московской области на светло-серых лесных глееватых почвах Подольско-Коломенского ополья, сформированных на покровных лессовидных суглинках. Здесь осенью 1988 г. был создан уникальный с точки зрения возможности осуществления режимных стационарных наблюдений экспериментально-мелиоративный полигон по проекту «Мосгипроводхоз». Впервые в практике мелиоративного осушения мы имеем возможность изучать изменение свойств и режимов почв по отношению к первому году действия дренажа на протяжении уже почти 30 лет. Исследования приурочены к фиксированным точкам наблюдений и проведены одними и теми же методами в разные годы обеспеченности осадками, начиная с 1988 года. Дренажные системы, площадью 2-4 га каждая, строились в 3-х кратной повторности для каждого варианта опыта: 1-й - светло-серые лесные глееватые почвы, осушенные пластмассовым дренажом с



помощью дренаукладчика МД-4 на глубину 100-120 см и 2-й вариант - эти же почвы, осушенные гончарным дренажом с помощью дренаукладчика ЭТЦ - 202 на ту же глубину с междренним расстоянием - 16 м. Также рассматривались эколого-гидрологические условия, свойственные светло-серым лесным глубокооуглееным и глееватым почвам с естественным водным режимом. Все исследованные почвы (неосушенные и осушенные) сформированы на близких или тождественных по гранулометрическому составу породах - крупнопылевато-иловатом покровном суглинке.

Свойства и режимы серых оуглеенных и осушенных почв исследованы не только классическими (Воронин, 1986), но и современными методами: определение пула лигниновых фенолов методом мягкого щелочного окисления органического вещества оксидом меди в азотной среде с последующим использованием хроматографии тонкого слоя, ^{13}C и ^{31}P -ЯМР-спектроскопия, модифицированная методика определения аминсахаров, определение изотопного анализа углерода органического вещества (Ковалев, 2015). Важно, что учет урожая проводили прямым комбайнированием по линиям нормальным к дренам на учетных площадках (2-4 га). В них входила треть площади полигона с гончарным или пластмассовым дренажом, исключая влияние открытых каналов и дрена прилегающего полигона.

Результаты и обсуждение

Водный режим определяет признаки гидроморфизма почв. Показано, что гидрологический режим серых лесных глубокооуглеенных почв характеризуется наличием нижнего яруса верховодки после снеготаяния. Особенностью глееватых почв является наличие двухъярусной верховодки, которая сохраняется до начала-середины мая (Зайдельман, Ковалев, 1994). Ее верхний ярус приурочен к пахотному слою, а нижний располагается на глубине 7-75 см. Между этими двумя горизонтами полного обводнения существуют зоны с влажностью, равной наименьшей влагоемкости (НВ) и в интервале: наименьшая влагоемкость – полная влагоемкость (НВ-ПВ). Именно в это время в серых лесных глееватых почвах с естественным водным режимом наблюдается снижение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) до 280-300 мВ и возникают анаэробные условия. Летом обычно наблюдаются выравненные значения ОВП в почвах начальных стадий гидроморфизма (глубокооуглеенные ---> глееватые). Эти характерные различия гидрологического и окислительно-восстановительного режимов серых лесных почв разной степени оуглеения сказываются статистически значимо на физических и химических свойствах почв, в том числе и в конкреционных новообразованиях (табл. 1). Под влиянием заболачивания почв происходит увеличение плотности сложения, удельной поверхности в верхних горизонтах, уменьшение общей порозности, порозности агрегатов, пор инфильтрации, аэрации, влагопроводящих пор, значений вертикальной фильтрации.

Значения коэффициента заболоченности (Fe/Mn) адекватно отражают степень заболоченности почв в светло-серых почвах с естественным увлажнением. Для глубокооуглеенных почв значения (Fe/Mn) составляют около 7, глееватых – до 16. Данные по количеству ортштейнов, по распределению содержания железа, марганца, углерода, азота, серы, фосфора, пулу лигниновых фенолов в ортштейнах серых почв Подольско-Коломенского ополья с естественным водным режимом имеют близкие или тождественные значения независимо от обеспеченности года осадками и характера использования этих почв на протяжении 30 лет (табл. 1) и позволяют достоверно диагностировать степень заболоченности этих почв даже на уровне видовых различий (глубокооуглеенные, глееватые, глеевые почвы).



Таблица 1. Многолетняя динамика содержания ортштейнов в светло-серых лесных оглеенных почвах (г/100 г абсолютно-сухой почвы), n=5

| Почва | Годы→ | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | 1989 г. | 1992-1994 гг. | 1995-1996 гг. | 2000 г. | 2008-2009 гг. | 2010 г. | 2012 г. | 2016-2018 гг. | |
| Масса ортштейнов в г/100г абс. сухой почвы | | | | | | | | | |
| глееватая (гидроморфная) | 2.30± 0.098 | 2.20± 0.105 | 2.16± 0.140 | 2.22± 0.088 | 2.26± 0.097 | 2.27± 0.077 | 2.29± 0.067 | 2.16± 0.083 | |
| глубокооглеенная (автоморфная) | 0.26± 0.018 | 0.27± 0.020 | 0.26± 0.015 | 0.29± 0.020 | 0.27± 0.040 | 0.28± 0.046 | 0.28± 0.054 | 0.26± 0.048 | |

Наблюдения показывают, что дренаж во влажные, средние и сухие годы оказывает весьма существенное влияние на режим влажности глееватых почв. При наличии дренажа в глееватых почвах не только устраняется двухъярусная верховодка, но обычно исчезает гравитационная влага из нижних горизонтов. Влажность почвы при этом на протяжении большей части теплого периода оказывается в оптимальном диапазоне – наименьшая влагоемкость-влажность разрыва капиллярной связи (НВ-ВРК). Окислительно-восстановительный потенциал возрастает до 420-470 мВ, обеспечивая господство окислительной обстановки на протяжении сухого периода. Выявлены определенные различия в действии траншейного гончарного и бестраншейного пластмассового дренажа. На протяжении пяти контрастных по влажности лет показано, что с помощью гончарного и пластмассового дренажа может быть достигнут близкий или тождественный эколого-гидрологический эффект. Это позволяет признать, что бестраншейный пластмассовый дренаж без применения траншейных фильтров на серых глееватых почвах с Кф 0,1-0,3 м/сут оказывает такое же или более интенсивное гидрологическое действие, что и гончарный дренаж. На осушенных серых глееватых почвах формируются благоприятные условия для возделывания культур полевых севооборотов (табл. 2).

Таблица 2. Урожайность сельскохозяйственных культур на светло-серых оглеенных недренированных и дренированных почвах (т/га). Уборка прямым комбайнированием (комбайн «Дон-1500») с площади каждой системы (2-4 га) по полосам перпендикулярно дренажным линиям

| Полигоны | Сухой год, 86/73 (вико-злаковая смесь на зерно) | Умеренно-сухой год, 33/46 (озимая пшеница) | Влажный год, 49/25 (озимая пшеница) | Умеренно- влажный год, 33/46 (ячмень) |
|--|---|--|---|---|
| Контроль | Глееватая почва, недренированная (контроль) | | | |
| - | 3.98 | 0.62 | 2.90 * | |
| Глееватая почва, дренированная. Пластмассовый дренаж | | | | |
| 5-1 | 2.12 | 4.58 | 2.94 | 4.04 |
| 5-2 | 2.60 | 5.14 | 4.00 | 3.94 |
| 5-3 | 2.58 | 4.32 | 6.57 | 2.54 |
| Среднее | 2.43 | 4.67 | 4.50 | 3.51 |
| Глееватая почва, дренированная. Гончарный дренаж | | | | |
| 4-1 | 2.06 | 5.10 | 3.47 | 4.32 |
| 4-2 | 2.50 | 5.60 | 4.81 | 3.77 |
| 4-3 | 2.48 | 4.61 | 5.10 | 2.56 |
| Среднее | 2.35 | 5.10 | 4.46 | 3.55 |

* – посев на месяц позже из-за полного обводнения; М – среднее арифметическое; t – критерий Стьюдента; m – ошибка среднего; 86/73 -- обеспеченность осадками: за вегетационный период (IV – X)/ за год



Так, при осушении бестраншейным пластмассовым и траншейным гончарным дренажем глееватых почв всегда в средние и влажные по осадкам годы происходит существенное увеличение урожайности сельскохозяйственных культур по сравнению с недренированными глееватыми почвами. Она оказывается близкой к урожайности культур на незаболоченной глубокооглеенной (автоморфной) почве. Оценка разности средних по урожайности культур на почвах, осушенных этими двумя видами дренажа, показывает, что различия не достоверны при 5 % и, как правило, при 1 % уровне значимости (табл. 2).

Действие разных видов закрытого дренажа способствуют увеличению водопрочности структуры, в том числе и в нижних слоях. Так, на 19-й год последствия дренажа содержание агрономически ценных агрегатов увеличивается по профилю независимо от вида дренажа. Осушение и подземная биомасса растений способствует увеличению количества агрономически ценных агрегатов не только в верхних горизонтах профиля, но и в нижних. По кривым ОГХ были рассчитаны распределения объемов пор по размерам и по функциям (Воронин, 1986). Осушение оказывает влияние на увеличение пор инфильтрации, аэрации и влагопроводящих пор, особенно, в иллювиальных горизонтах. Значения K_f связаны с распределением объемов пор по размерам и по функциям. Под воздействием осушения заметно повышаются значения K_f , установленных как методом Хануса, так и методом рам. Перед строительством дренажа серым лесным глееватым почвам были свойственны низкие и средние значения вертикальной фильтрации (0,1 – 0,3 м/сут), после осушения – средние и высокие.

Дренаж интенсифицирует вынос с дренажным стоком тонких фракций мелкозема. Однако, несмотря на имеющиеся в литературе указания об активной миграции ила под влиянием дренажа нами на третий год действия дренажной системы не были обнаружены статистически значимые изменения содержания илистой фракции между контролем и дренированным участком в середине междурья. В непосредственной близости от дрены (на расстоянии 1 м от дренажной линии) также не были установлены значимые изменения содержания илистой фракции и физической глины. Это заключение оказалось справедливым как для вариантов опыта с гончарным, так и бестраншейным пластмассовым дренажом. За 30-летний период действия дренажной системы, можно говорить лишь о тенденции миграции илистой фракции.

Дренаж приводит и к активизации микробиологической деятельности, которая прямо регистрируется по увеличению длины грибного мицелия и общей биомассы микроорганизмов и косвенно – по увеличению доли диэфиров микробного происхождения на ^{31}P ЯМР-спектрах: с 6 до 11 % и с 9 до 12 % от площади спектра, а также по увеличению содержания аминсахаров и мурамина в почвах ($p < 0.95$). В результате произошла и деструкция лигнина в агроэкосистемах. Согласно величинам отношения лигнин/к азоту (VSC/N) в осушенных почвах наблюдается и преобладание метаболического углерода над ароматическим. Сумма продуктов окисления лигнина падает ($p < 0.95$) с 13 мг г⁻¹ Сорг. до 9 мг г⁻¹ Сорг. Возрастает ($p < 0.99$) степень окисленности (отношение сиреневые кислоты/к сиреневым альдегидам) и степень измененности боковых цепочек лигнина (VSC) по отношению к исходным растительным тканям: с 4.6 до 6.5. В результате, наблюдается увеличение соотношения Сгк:Сфк в гумусовых горизонтах от 0.93-1.18 до 1.53-1.98. Данный факт подтверждается и увеличением на 30 % площади пика углерода углеводов в области 60-106 ppm, по результатам ^{13}C ЯМР-спектроскопии, в молекулах ГК светло-серых глееватых осушенных почв. Изменение перечисленных показателей в осушенных почвах в конечном итоге свидетельствует об аэрации почв, интенсификации окислительных процессов и мобилизации органического вещества в них, улучшении агроэкологических условий для



роста и развитии растений (табл. 2). Благоприятные условия для развития ризосферы и общей продуктивности растений характерны и для вторичных вертикальных литологических структур (дренажных и щелевых засыпок). Эти структуры создают вторичную гидрологическую и литологическую неоднородность, возникающие под влиянием дренажа и усугубляют пестроту почвенного покрова, обусловленную первичной неоднородностью водного режима, степенью заболоченности почв, гранулометрическим составом.

Осушение почв (28-летний период действия дренажной системы) с переменным ОВ-режимом способствует замыканию биогеохимических циклов, высвобождая элементы из новообразований по мере деградации последних на примере разрушительной трансформации соединений железа, марганца, углерода, азота, серы, фосфора, молекул гуминовых кислот и лигнина и по отношению к первым годам (1989-1992 гг.) последствия пластмассового и гончарного дренажа на фоне непрекращающегося процесса ортштейнообразования. В то же время, как морфологические свойства осушенных почв, так и значения коэффициента заболоченности (K_z) не отражают четко этих изменений. Значения Fe/Mn остаются близкими и на 8-й год последствия дренажа. Содержание углерода в ортштейнах адекватно отражает гидрологический режим осушенных почв. На основе детального изучения продуктивности растений, свойств и режимов светло-серых почв на протяжении 30 лет предлагается использовать параметр «содержание углерода в железисто-марганцевых ортштейнах»: во-первых, для диагностики степени гидроморфизма почв с естественным увлажнением; во-вторых, для адекватной оценки действия дренажных систем и необходимости проведения их мелиоративной реконструкции.

Заключение

Наличие комплексной информации о свойствах и режимах естественных и осушенных почв разными видами дренажа позволит оценить целесообразность развития дренажа на сельскохозяйственных землях России. Осушение пластмассовым и гончарным дренажом существенно изменяет гидрологический и ОВП режимы, физические и химические свойства, гумусное состояние серых лесных оглеенных почв, в результате формируются новые агроэкологические условия, благоприятные для ведения сельскохозяйственного производства и внедрения адаптивно-ландшафтных систем земледелия.

Благодарность

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-14-01120

Литература

- Воронин А.Д. (1986) Основы физики почв: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та. 244 с.
- Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В. (1994) Эколого-гидрологическая оценка светло-серых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом. // *Почвоведение*. № 1. С. 116-127.
- Ковалев И.В. (2015) Биохимия лигнина в почвах // Автореф. диссер. д.с.-х.н. по специальности «почвоведение». М. 50 с.



УДК 631.445, 911.5, 911.6

МУЛЬТИМАСШТАБНЫЕ ПОЧВЕННО-ЛАНДШАФТНЫЕ КАРТЫ КАК ОСНОВА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МЕЛИОРАЦИИ ПОЧВ

Никифорова А.А.¹, Флейс М.Э.², Казанцев Н.Н.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
nikifsoil@gmail.com

²Институт географии РАН, Москва, Российская Федерация
fleis@igras.ru

Annotation: The necessity of creating multiscale soil-landscape maps for making scientifically based decisions on soil melioration at all levels is substantiated. The advantages of these maps are shown in comparison with traditional and modern digital soil maps, which are due to the use of the genetic hierarchical Soil-Landscape Classification System as the classification basis.

Для создания научно обоснованной иерархической системы принятия решений по мелиорации почв на всех уровнях (от глобального до локального) необходима интегрированная, имеющая единую картографическую основу информация не только о почвах, но и обо всех факторах почвообразования. В качестве такой основы предлагается использовать мультимасштабные почвенно-ландшафтные карты, создаваемые в среде географических информационных систем (ГИС). Традиционные и современные цифровые почвенные, ландшафтные и другие тематические карты ни по отдельности, ни все вместе для этого использованы быть не могут, так как они создавались и продолжают создаваться в разных масштабных диапазонах (или масштабах), в разных системах координат, с использованием разных теоретических концепций и разных географических и классификационных основ, и, как следствие, содержат неоднородную, недостаточную, часто несогласованную и противоречивую информацию о почвах и факторах почвообразования.

Интеграция пространственных данных о почвах и факторах почвообразования является фундаментальной проблемой почвоведения. Однако, из всех видов интеграции в настоящее время осуществляется, главным образом, только пространственная, географическая и горизонтальная интеграция. Под пространственной интеграцией мы понимаем приведение пространственных данных к базовой системе координат, под географической - привязку пространственных данных к единой географической основе, под горизонтальной - интеграцию тематического содержания пространственных данных в пределах одного масштабного диапазона (масштаба). Горизонтальная интеграция пространственных данных о почвах и факторах почвообразования осуществляется в настоящее время следующими способами: 1) путем создания единой (всемирной) почвенной классификационной системы (IUSS Working Group WRB, 2015); 2) путем создания глобальной почвенной карты (GlobalSoilMap.net) независимо от создания единой классификации почв; 3) путем создания карт, отображающих почвенные классы и свойства почв, на основе современных технологий, математических и статистических методов педометрики и численных (количественных) классификаций (Hughes et al., 2014; McBratney and de Gruijter, 1992; McBratney et al., 2003; Parrochia, 2017); 4) путем проведения в среде ГИС оверлейных операций (Hartemink et al., 2013). В то же время, другим типам интеграции уделяется незаслуженно мало внимания. К ним относятся:



- Тематическая интеграция, то есть, интеграция тематического содержания пространственных данных на основе единой классификационной системы (Никифорова и др., 2014).
- Вертикальная интеграция, то есть, интеграция тематического содержания пространственных данных всех масштабных диапазонов. Среди немногих исследований по данному типу интеграции можно назвать работу Самсонова (2010) по картографированию рельефа.
- Временная интеграция, то есть, интеграция пространственных данных, изменяющихся во времени в результате эволюции, смены условий окружающей среды или воздействия на них антропогенных факторов.

Все названные типы интеграции, осуществляемые совместно, означают глобальную, (всеобъемлющую) интеграцию. Как показывает наш опыт, решить проблему глобальной интеграции пространственных данных о почвах и факторах почвообразования можно, если использовать: 1) системный подход, который заключается в рассмотрении объектов как систем и элементов систем (Bertalanffy, 1968); 2) современные теории классификации (Розова, 1986; Субботин, 2001; Hjørland, 2017) и 3) фундаментальные концепции почвоведения и ландшафтоведения, прежде всего, определение почв Докучаева (1879, 1886). Однако, попытки применения системного подхода в почвоведении и ландшафтоведении на сегодняшний день немногочисленны, не до конца реализованы, и потому мало успешны (Карпачевский, 1981; Николаев, 1979; Солнцев, 1981; Chorley and Kennedy, 1971; Juma, 1999), современные теории классификации при разработке почвенных классификационных систем в основном игнорируются, а определение почв Докучаева, как правило, используется лишь частично, то есть, обычно принимается во внимание его первая часть (почва – это природное тело), тогда как его вторая часть, не менее важная (почва – это результат взаимодействия факторов почвообразования), - в основном, только декларируется (Nikiforova and Fleis, 2018). В результате, существующие почвенные классификационные системы и создаваемые на их основе карты, отображают почвы, главным образом, как самостоятельные природные тела, а не как результат взаимодействия факторов почвообразования.

Под мультимасштабными почвенно-ландшафтными картами понимается система взаимосвязанных карт всех масштабных диапазонов, имеющих единую классификационную основу, содержащих интегрированную (то есть, структурированную, согласованную, образующую единую систему) информацию о почвах и ландшафтах и отображающих почвы как самостоятельные природные тела (или системы) и как производные элементы ландшафтных систем (Никифорова и др., 2018; Флейс и др., 2016). Эти карты существенно облегчают анализ условий почвообразования, позволяют выявлять почвенно-ландшафтные связи и закономерности географического распространения почв и ландшафтов, прогнозировать изменение свойств почв и других элементов ландшафтов. Примерами мультимасштабных почвенно-ландшафтных карт являются карты типов вертикального строения ландшафтов, состава ландшафтных элементов (наличия/отсутствия почв), свойств ландшафтных элементов (к последним относятся карты типов мегарельефа, зональных типов коренной растительности и почв, формирующихся под этими типами растительности, гранулометрического состава почвообразующих пород и почв, формирующихся на этих породах, химического состава грунтовых вод и засоленности почв).

Классификационной основой мультимасштабных почвенно-ландшафтных карт является разрабатываемая нами с использованием современных теорий классификации генетическая иерархическая Почвенно-ландшафтная классификационная система, представляющая собой полную иерархию и объединяющая ландшафтную и почвенную классификационные системы



(Nikiforova et al., 2019; Nikiforova, 2019). Объектами классификации являются природные почвы и ландшафты. С позиции системного подхода природными ландшафтами, являющимися природной и концептуальной основой антропогенных ландшафтов, мы называем материальные системы, состоящие из взаимодействующих и взаимосвязанных природных элементов (основных - горных пород, воды, воздуха, живых и отмерших организмов, - и производных - почв), природными ландшафтными элементами - минимальные структурные единицы природных ландшафтных систем, представленные материальными субстанциями с однородными свойствами, и природными почвами – производные ландшафтные элементы, образующиеся в результате взаимодействия основных ландшафтных элементов и являющиеся одновременно самостоятельными материальными системами.

Мультимасштабные почвенно-ландшафтные карты создаются с использованием ГИС-технологий на основе, прежде всего, экспертного анализа существующих тематических карт, содержащих информацию о почвах и основных ландшафтных элементах и их свойствах, с привлечением данных дистанционного зондирования Земли, цифровых моделей рельефа, метеорологических данных, результатов полевых и лабораторных исследований, а также литературных данных. Эта информация включает данные о макро-, мезо- и микроклимате; осадках, температуре воздуха и почв, относительной влажности воздуха, испарении с поверхности почв; формах мезо-, макро-, мезо- и микрорельефа и их элементах; уклонах поверхности, экспозиции склонов, естественной дренированности и геологическом строении территории и литологическом составе почвообразующих и подстилающих пород; глубине залегания, минерализации и интенсивности дополнительного питания грунтовых вод; водообеспеченности территории, наличии и характеристиках водохранилищ, рек, озер, прудов; зональных типах растительности; мощности, гранулометрическом составе, влагоемкости, водопроницаемости, капиллярной проводимости горизонтов почв; высоте капиллярного поднятия, степени и типе засоления почв, почвообразующих и подстилающих пород, водно-солевом режиме почв и содержании в них питательных веществ, подверженности почв эрозии и т.д.

ГИС-картографирование является естественным продолжением традиционного картографирования, но на более высоком, качественно новом технологическом уровне. Благодаря ГИС могут быть устранены многие недостатки традиционных почвенных и ландшафтных карт, например, может быть значительно увеличена их информативность (Савин и Овечкин, 2014; Wielemaker et al., 2001). Это связано, в том числе, с тем, что основополагающими принципами ГИС являются обеспечение связи между координатными (картографическими) и атрибутивными (текстовыми, описательными) пространственными данными и послойное их отображение. Кроме того, ГИС позволяют работать с практически неограниченным объемом пространственных данных, а именно, накапливать, отображать, согласовывать, формализовывать, структурировать и интегрировать эти данные. Basher (1997) высказал следующее мнение о значении разномасштабной интеграции информации с использованием ГИС: «Возможно, одной из наиболее серьезных проблем является интеграция разномасштабной информации [...] в ГИС и почвенных информационных системах». В свою очередь, мы рассматриваем ГИС как инструмент глобальной интеграции пространственных данных о почвах и факторах почвообразования (или, если следовать терминологии системного подхода, о почвах, основных элементах ландшафтов и их свойствах).

Мультимасштабные почвенно-ландшафтные карты получают автоматизировано из интегральных полигональных слоев (Рис.1), создаваемых на основе экспертного анализа по



возможности как можно большего объема имеющейся информации о почвах и факторах почвообразования для каждого масштабного диапазона, которые содержат интегрированную информацию о почвах, основных элементах ландшафтов и их свойствах и связаны между собой. В интегральные слои может быть также включена информация о возможностях использования и улучшения почв и ландшафтов, соответствующая разным масштабным уровням системы принятия решений, что позволяет получать соответствующие карты. Создание карт опробовано на примере равнинной территории Европейской части России (Флейс и др., 2016).

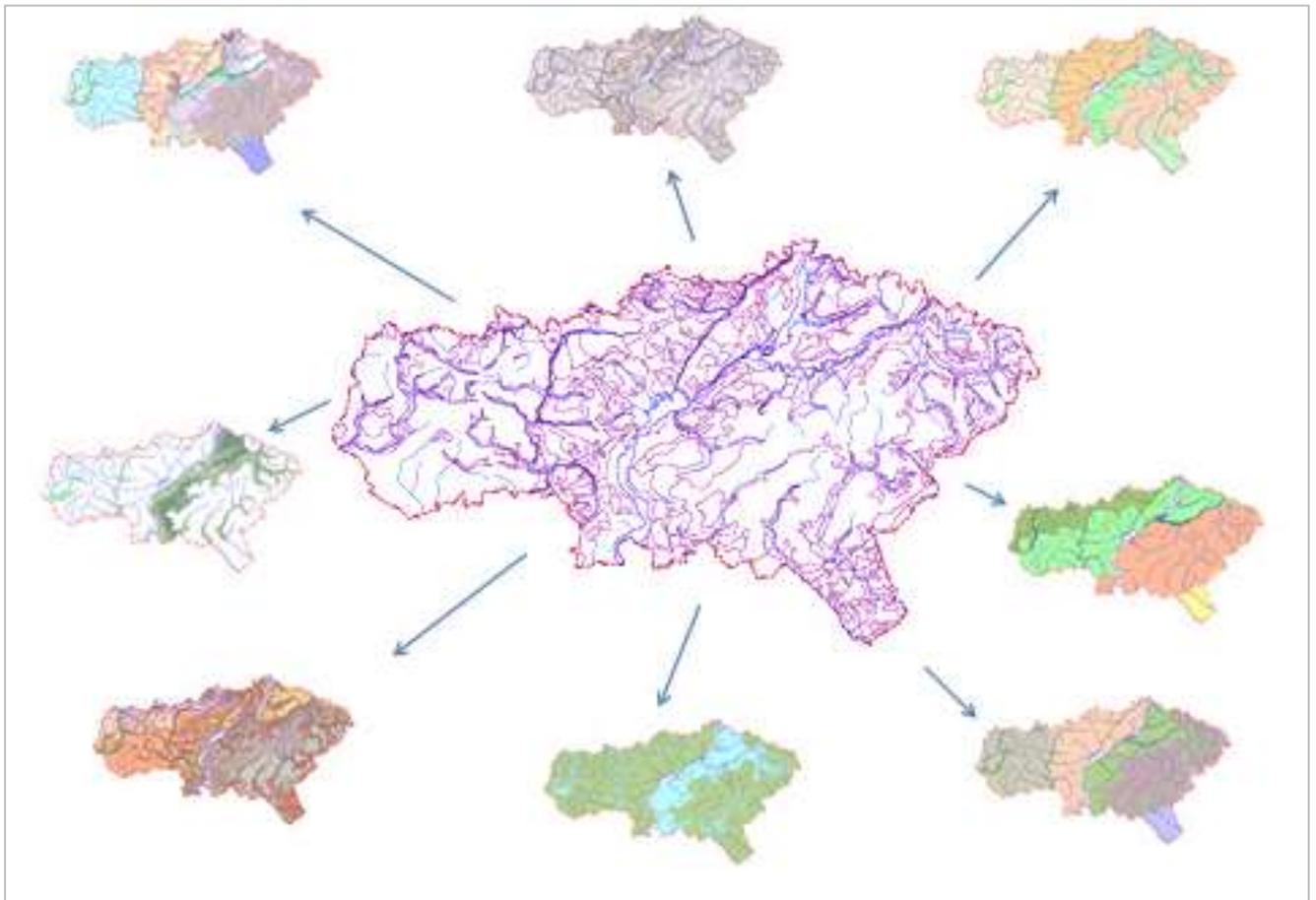


Рис.1. Мультимасштабные почвенно-ландшафтные карты Саратовской области, Россия, получаемые автоматизировано в ГИС из одного интегрального полигонального слоя масштабного диапазона 1:1 000 000 – 1:2 500 000 (Nikiforova et al., 2014).

Таким образом, мультимасштабные почвенно-ландшафтные карты могут быть рекомендованы в качестве основы для создания научно обоснованной иерархической системы принятия решений по мелиорации почв на всех уровнях (от глобального до локального), так как содержат всю необходимую для этого информацию. На Рис.2 необходимые условия создания научно обоснованной иерархической системы принятия решений по мелиорации почв показаны в виде схемы.



Рис. 2. Необходимые условия для разработки научно обоснованной иерархической системы принятия решений по мелиорации почв.

Создание карт стало возможным благодаря использованию системного подхода, современных теорий классификации, фундаментальных концепций почвоведения и ландшафтоведения, разрабатываемой на их основе иерархической генетической Почвенно-ландшафтной классификационной системы, а также ГИС-технологий.

Литература

- Докучаев В.В. (1879) Картография русских почв. Объяснительный текст к почвенной карте Европейской России, изданной Департаментом земледелия и сельской промышленности (СПб: Типография Киришаума).
- Докучаев В.В. (1886) Материалы к оценке земель Нижегородской губернии. Естественно-историческая часть: Отчет Нижегородскому губернскому земству. Выпуск 1. Главные моменты в истории оценок земель Европейской России, с классификацией русских почв (СПб: Типография Е. Евдокимова).
- Карпачевский Л.О. (1981) Лес и лесные почвы (М.: Лесная промышленность).
- Никифорова А.А., Флейс М.Э., Борисов М.М. (2014) Тематическая интеграция пространственных данных о природных элементах ландшафтов в среде ГИС. Известия РАН. Серия географическая **1**, 85-93.
- Никифорова А.А., Флейс М.Э., Нырцов М.В. (2018) Создание карт природных ландшафтных систем в среде ГИС. Ред. Виктор Г. Сычёв и Лотар Мюллер, Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Том 2: Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах (М.: Изд-во ФГБНУ ВНИИ агрохимии), 29–34.
- Николаев В.А. (1979) Проблемы регионального ландшафтоведения (М.: Изд-во Моск. ун-та).
- Розова С.С. (1986) Классификационная проблема в современной науке (Новосибирск: Наука, Сибирское отд-е).
- Савин И.Ю., Овечкин С.В. (2014) Об обновлении среднemasштабных почвенных карт Почвоведение **10**, 1184-1192.



- Самсонов Т.Е. (2010) Мультимасштабное картографирование рельефа на основе создания баз геоданных. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. географ. наук (М.).
- Солнцев В.А. (1981) Системная организация ландшафтов: Проблемы методологии и теории (М.: Мысль).
- Субботин А.Л. (2001) Классификация (М.: Изд-во Института философии РАН).
- Флейс М.Э., Никифорова А.А., Нырцов М.В., Борисов М.М., Хропов А.Г. (2016) Создание масштабного ряда почвенно-ландшафтных карт в геоинформационной среде. Известия РАН. Серия географическая **1**, 147–155.
- Basher L.R. (1997) Is pedology dead and buried? *Australian Journal of Soil Research* **35**, 979-994.
- Bertalanffy L. (1968) *General System Theory: Foundations, development and applications* (New York: George Braziller).
- Chorley R.J. and Kennedy B.A. (1971) *Physical geography: A systems approach* (Prentice-Hall International).
- GlobalSoilMap.net project. Electronic source: <https://www.globalsoilmap.net/>
- Hartemink A.E., Krasilnikov P. and Bockheim J.G. (2013) Soil maps of the world. *Geoderma* **207-208**, 256-267.
- Hjørland B. (2017) Classification. *Knowledge Organization* **44(2)**, 97-128.
- Hughes P.A., McBratney A.B., Minasny B. and Campbell S. (2014) End members, end points and extragrades in numerical soil classification. *Geoderma* **226-227**, 365-375.
- IUSS Working Group WRB (2015) *World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports* **106** (Rome: FAO).
- Juma N.G. (1999) *The pedosphere and its dynamics: A systems approach to soil science. Vol. 1: Introduction to soil science and soil resources* (Edmonton, University of Alberta: Salman Productions).
- McBratney A.B. and de Gruijter J.J. (1992) A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. *Journal of Soil Science* **43(1)**, 159-175.
- McBratney A.B., Santos M.L.M. and Minasny B. (2003) On digital soil mapping. *Geoderma* **117**, 3–52.
- Nikiforova A.A. (2019) Soil classification. In: Hjørland B. and Gnoli C. (Eds.) *ISKO Encyclopedia of Knowledge Organization*. <http://www.isko.org/cyclo/soil>
- Nikiforova A.A., Bastian O., Fleis M.E., Nyrtsov M.V. and Khropov A.G. (2019) Theoretical development of a natural soil-landscape classification system: An interdisciplinary approach. *Catena* **177(6)**, 238-245. <https://authors.elsevier.com/a/1Yg3w1Dk5AL7EP>
- Nikiforova A.A. and Fleis M.E. (2018) A universal soil classification system from the perspective of The General Theory of Classification: A review. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* **14**, 5–13.
- Nikiforova A.A., Fleis M.E. and Borisov M.M. (2014b) Towards methodologies for global soil mapping. In: *GlobalSoilMap: Basis of the global spatial soil information system. Proceedings of the 1st GlobalSoilMap Conference, Orleans, France, 7-9 October 2013*. Arrouays et. al (Eds). (Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema), 291-294.



УДК.622.2+66.08

ИНТЕРПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ГУМАТОВ КАЛИЯ И ПОЛИ(ДИАЛЛИЛДИМЕТИЛАММОНИЙ ХЛОРИДА) КАК СВЯЗУЮЩИЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Панова И.Г.¹, Хайдапова Д.Д.², Киушов А.А.¹, Ильясов Л.О.¹, Ярославов А.А.¹

¹Химический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

igpan@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

dkhaydapova@yandex.ru

INTERPOLYELECTROLITE COMPLEXES OF POTASSIUM HUMATE AND POLY(DIALLYLDIMETHYLAMMONIUM CHLORIDE) AS SAND-FIXING AGENTS

Panova I.G.¹, Haidapova D.D.², Kiushov A.A.¹, Ilyasov L.O.¹, Yaroslavov A.A.¹

¹Chemistry Department, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Department of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The efficiency of use of potassium humates/polycation complexes with various composition and charge as binders for sand has been compared. It was shown that the strength of polymer-sand coatings, reflecting the efficiency of soil binding with polymers, increased from 1.5 to 390 kg/cm² with an increase in content of polycation in complex.

Введение

Закрепление песчаного грунта является одной из актуальных задач общей проблемы искусственного структурообразования почв/грунта. Перемещение песка под воздействием ветра в районы орошаемого земледелия губительно влияет на выращивание сельскохозяйственных культур в Центральной и Средней Азии Прикаспийском районе, районе Арала (Петров, 2016). Рост количества очагов подвижных барханных песков ведет к неконтролируемому опустыниванию и деградации окружающей среды. Серьезной проблемой является вынос песка в ствол нефтяных и газовых скважин, являющийся основной причиной их повреждений и вывода из эксплуатации (Liu, 2018). Для борьбы с распространением песка используются различные подходы, в том числе с использованием химических препаратов, цемента, кремнийорганических соединений, синтетических смол, латексов и их комбинаций (Liu, 2018; Цицорин, 2014).

В настоящем исследовании впервые сопоставлена эффективность использования в качестве связующих кварцевого песка девяти экологически безопасных полимеров: интерполиэлектродитных комплексов, полученных на основе одной пары водорастворимых полиэлектролитов. Поликатионом служил поли(диаллилдиметиламмоний хлорид) (ПДАДМАХ), полимер линейно-циклической структуры. ПДАДМАХ нашел широкое применение как низкотоксичный флокулянт в системах очистки воды. В качестве анионной полимерной составляющей ИПЭК использованы калиевые соли гуминовых кислот (ГК). Это уникальные природные макромолекулы сложного стохастического строения, содержащие в качестве преобладающих карбоксильные функциональные группы. Гуминовые кислоты и их производные нашли широкое применение в агрохимии в качестве удобрений и иммуностимуляторов растений (Ouni, 2014). Цель работы заключалась в исследовании влияния состава и заряда поликомплексов на механические свойства и водостойкость композиционных покрытий, формирующихся при нанесении 1% водных дисперсий/суспензий комплексов на поверхность мелкозернистого кварцевого песка.



Экспериментальная часть

В качестве полиэлектролитов, составляющих поликомплексы, использованы поли(диаллилдиметиламмоний хлорид) с $M_w = 400-500$ кДа (Sigma-Aldrich, США) и гуматы калия (Humintech GmbH, Германия) с $M_w 9,9$ кДа. Фракционированный речной кварцевый песок ГОСТ 8736-2014 с месторождения Подгорненское (Московская область) с округлой формой зерен размером 0,5-1 мм очищали от примесей (3% по массе) многочисленными промываниями в бидистиллированной воде. Чистоту подтверждали методами РФА. Рентгенофазовые исследования проводили на дифрактометре URD-6 (Германия). Излучение $CuK\alpha$, фильтрованное никелем. Съёмка велась на пропускание (по Дебаю-Шереру). Эксперименты по динамическому светорассеянию (ДСР) и лазерному микроэлектрофорезу проводили на приборе Brookhaven 90 Plus (Brookhaven Instruments Company, США).

Обработку песка полимерами проводили следующим образом. В чашечки Петри вносили 100 г песка, так что получался слой около 1 см. На образцы равномерно разбрызгивали 25 мл 1% водной дисперсии/суспензии поликомплекса, что отвечало соотношению 3 л/м². В контрольных экспериментах наносили 25 мл дистиллированной воды, либо 1% раствора ГК или ПДАДМАХ. Образцы сушили в течение 3-4 суток до постоянного веса.

Орошение образцов песка водой, имитируя дождевание, проводили через садовый опрыскиватель (давление около 2 атмосфер) в течение 15 мин с расстояния 20 см. Скорость подачи составляла около 200±10 мм/ч. Угол наклона чашечек составил 45±3 град. Сточную воду и смытый песок собирали в специальные лотки. Объем собранной воды в каждом эксперименте составлял 200±10 мл. Смытый песок отделяли центрифугированием, промывали водой и сушили до постоянного веса. Смывные воды подвергали лиофильной сушке для выделения смытой полимерной композиции.

Для измерения прочностных характеристик композиционных покрытий, формирующихся на поверхности песка, был использован пенетрационный метод с использованием конического пластометра П.А. Ребиндера (Хайдапова, 2007). Образцы песчаного грунта с композиционным покрытием на поверхности готовили следующим образом. В пластиковые стаканчики помещали 60 г кварцевого песка, так, что высота слоя грунта составила около 5 см, а площадь поверхности около 17 см². Сверху разбрызгивали ~5 мл 1% водной дисперсии/суспензии ИПЭК, что составило около 3 л/м². Образцы сушили до постоянного веса, при этом на поверхности образовывался слой полимер-песчаной корки (ППК), толщиной от 4 до 7 мм. Экспериментально по шкале прибора измерялась глубина погружения металлического конуса с углом раскрытия $\alpha=30^\circ$ в ППК, (h_m), под нагрузкой, необходимой для появления на ее поверхности трещины, (F). Прочность, P_l , рассчитывали по формуле Ребиндера в кг/см²:

$$P_l = K^1_\alpha \frac{F}{h_m^2}, \text{ где } K^1_\alpha=4.4$$

Результаты и их обсуждение

На основании изучения взаимодействия полианиона, ГК, и поликатиона, ПДАДМАХ, методами лазерного микроэлектрофореза и динамического светорассеяния разработано девять полимерных композиций – нестехиометрических и стехиометрического интерполиэлектролитных комплексов (ИПЭК). Композиции отличались друг от друга составом, выраженным в терминах отношения мольных концентраций ионизированных при рН7 групп блокирующего полиэлектролита, взятого в недостатке, к ионизированным группам лиофилизующего полиэлектролита, взятого в избытке ($Q<1$). В зависимости от природы полиэлектролита, находящегося в избытке, композиции нестехиометрических ИПЭК имели



либо положительный, либо отрицательный заряд ($Q(+)$ или $Q(-)$). Стехиометрический комплекс, образующийся при полной компенсации зарядов полиэлектролитов, $Q(0) = 1$, являлся электронейтральным. ИПЭК получали простым смешиванием 1% водных растворов ГК и ПДАДМАХ. Визуально, смеси представляли собой либо темно-коричневые гомогенные дисперсии (составы: $0,2 \leq Q(-) \leq 0,6$, $0,2 \leq Q(+) \leq 0,8$), либо рыхлые суспензии скоагулировавших хлопьев (составы: $Q(-) = 0,8$; $Q=1$). Обнаружено, что все ИПЭК проявляли длительную устойчивость к агрегации в 1% водных дисперсиях/суспензиях. Такое свойство позволило сопоставить эффективность использования всех композиций в качестве связующих. кварцевого песка.

При нанесении 1% водных дисперсий ИПЭК на поверхность песка (рис. 1 а) после высушивания формировались твердые композиционные полимер-песчаные покрытия/корочки (рис.1 б), предохраняющие высыпание песка из чашек Петри (рис.1 в). ППК были получены и при использовании индивидуального полиэлектролита, ПДАДМАХ. При обработке песка гуматами покрытия не образовывались.



Рис. 1. Изображения исходного песка (а), ППК на основе ИПЭК с $Q(+)=0,6$ (б), образца песка под структурированным покрытием (в).

Важным показателем, определяющим эффективность скрепления песка, является способность структурированного грунта сопротивляться разрушению под действием внешних сил. Для измерения прочностных характеристик ППК в воздушно-сухом состоянии использован пенетрационный метод конического пластометра (П.А. Ребиндера). Из данных, представленных в таблице 1 (колонка А), видно, что прочность ППК возрастала с повышением содержания в ИПЭК поликатиона, ПДАДМАХ.

Эксперименты по изучению сопротивления песка к смыву с наклонной поверхности показали, что дождевание приводит к уносу 29 ± 2 г песка из 100 г. После обработки водорастворимым гуматом калия количество смытого песка практически не уменьшилось (28 ± 2 г). Для образцов, обработанных ПДАДМАХ, его количество даже увеличилось до 35 ± 3 г, что объясняется, по-видимому, гидрофилизацией поверхности кварцевых частиц за счет адсорбции гидрофильного полимера и улучшением скольжения частиц с модифицированной поверхностью относительно друг друга. Данные, представленные в таблице 1 (колонка В), свидетельствуют о том, что, обработка песка большинством композиций ИПЭК привела к формированию защитных покрытий, существенно снижающих, либо полностью предотвращающих смыв грунта. Тем не менее эффективность защитных свойств исходного покрытия и водостойкость самих ИПЭК сильно зависела от состава композиции и степени компенсации заряда. Из таблицы (колонка Г) видно, что наиболее гидрофильные составы с максимальным содержанием одного из компонентов больше всего вымывались водой: 120мг



композиции с $Q(-) = 0,2$ и 100мг композиции с $Q(+)=0,2$ из нанесенных 250 мг. При этом смывалось и большее количество грунта. Составы близкие к стехиометрическому ($Q(-) = 0,8$, $Q(0) = 1$ $Q(+)$ = 0,6-0,8) демонстрировали существенно лучшую и сравнимую между собой водостойкость. Смывалось в среднем от 18 до 24 мг нанесенной композиции. Песок при этом не смывался. Среди составов, характеризующихся средней степенью компенсации зарядов, наиболее стойкой к смыву оказалась положительно заряженная композиция с $Q = 0,6(+)$. Было смыто 19мг композиции.

Таблица 1. Характеристики прочности и водостойкости полимер-песчаных покрытий (корок).

| А | Б | В | Г | Д |
|-------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Состав ИПЭК, Q | Прочность ППК P_m , кг/см ² , первоначальная | Количество смытого песка, г | Количество смытого ИПЭК, мг | P_m , кг/см ² , после обработки ППК водой |
| 0,2 (-) | 1,5±0,25 | 14±3 | 110±11 | 0 |
| 0,4 (-) | 3±0,3 | 10,3±2 | 75±7 | 0 |
| 0,6 (-) | 15±2 | 1±0,5 | 52±5 | 0 |
| 0,8 (-) | 60±5 | 0 | 24±4 | 3±0,5 |
| 1 (0) | 95±8 | 0 | 16±3 | 7±0,8 |
| 0,8 (+) | 150±15 | 0 | 18±3 | 137±15 |
| 0,6 (+) | 190±20 | 0 | 19±4 | 180±19 |
| 0,4 (+) | 340±27 | 6,4±1 | 65±7 | 18±2 |
| 0,2 (+) | 390±32 | 15±2 | 100±9 | 24±4 |

Показательной характеристикой эффективности ИПЭК оказалось и поведение композиционных корок после орошения водой и последующей сушки. Защитные покрытия на основе отрицательно заряженных композиций с составами $Q(-) = 0,2 - 0,6$ были практически полностью разрушены. Песок высыпался из чашечек Петри. При использовании составов $Q(-) = 0,8$, $Q(0)$ и $Q(+)$ = 0,2 - 0,8 защитные покрытия на поверхности песчаного грунта сохранялись. Значения прочности ППК после обработки водой и последующей сушки представлены в таблице 1 в колонке “Д”. Видно, что прочность большинства ППК на поверхности песка, даже сохранившихся после интенсивного дождевания, резко упала. Наибольшую водостойкость проявили ППК, полученные на основе положительно-заряженных составов с $Q(+)$ = 0,6 и 0,8. Прочность таких покрытий уменьшилась в среднем на 7 %.

Выводы

Показано, что при нанесении 1% водных дисперсий/суспензий ИПЭК на основе гуматов калия и поли(диаллилдиметиламмоний хлорида) на поверхность песка формируются композиционные полимер-песчаные покрытия, корки. Механическая прочность ППК, отражающая эффективность скрепления песка полимерами, увеличивается с ростом содержания в комплексе поликатаина. Защитные покрытия на основе большей части ИПЭК в отличие от ППК, полученных на основе индивидуальных полиэлектролитов, на 90-100% предотвращали смыв песка с наклонной поверхности при интенсивном дождевании. Наибольшую водостойкость проявили ППК на основе положительно-заряженных составов со средней и высокой степенью компенсации зарядов.



Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-25017).

Литература

- Петров К.М., Бананова В.А., Лазарева В.Г., Унагаев А.С. (2016) Региональные особенности глобального процесса опустынивания в Северо-Западном Прикаспии. *Биосфера* **8**, 49-62. www.elibrary.ru/item.asp?id=26298672.
- Liu J., Feng Q., Wang Y., Zhang D., Wei J., Kanungo D.P. (2018) Experimental study on unconfined compressive strength of organic polymer reinforced sand. *International Journal of Polymer Science*, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2018/3503415>.
- Цицорин А.И., Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А. (2014) Химические методы ограничения выноса песка в нефтяных и газовых скважинах. *Электронный научный журнал Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитики* **2**, 22-30. www.elibrary.ru/item.asp?id=22918133.
- Ouni Y., Ghnaya T., Montemurro F., Abdelly C., Lakhdar A. (2014) The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. *International Journal of Plant Production* **8**, 353-374. http://ijpp.gau.ac.ir/article_1614_d21a65de0aebdbd39542c9ec32e92eda.pdf.
- Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А. (2007) Прочность межчастичных связей в почвенных пастах и агрегатах. *Почвоведение* **11**, 1330–1335. DOI: 10.19047/0136-1694-2017-89-21-35.



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ НА АГРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГУМУСНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО ТАМБОВСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Печуркин А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, РФ,
pechurkin.as@gmail.com

INFLUENCE OF DROP IRRIGATION ON AGROPHYSICAL PROPERTIES AND THE HUMUS CONDITION
OF THE CHERNOZEM TYPICAL TAMBOV LOWNESS

Pechurkin A.S., Stepanцова L.V., Krasin V.N.
FSBEI HE Michurinsk SAU, Michurinsk, RF

Annotation: acidification of the soil under the influence of fertigation in orchard is accompanied by the restructuring of the mineral mass and changes in the composition of organic matter, as a result of the degradation of typical chernozem soil of the Tambov plain into chernozem-like podzolic soils.

Введение

В последние десятилетия увеличиваются площади плодовых насаждений с системой капельного орошения и фертигацией не только в степных районах России (Красько, 2014; Попов, 2009), но и в лесостепи и даже в таежно-лесной зоне (Овчинников, 2016). Проведено много исследований по оптимизации доз удобрения, вносимых при фертигации, в разных природно-климатических условиях (Красько, 2014; Овчинников, 2016; Попов, 2009), но практически нет работ по оценке ее влияния на свойства черноземов лесостепи. Несмотря на невысокие нормы полива система капельного орошения оказывает сильное влияние на водный режим и свойства почв, так как часто при ее эксплуатации используются кислые растворы. Даже незначительные изменения водного режима черноземов сопровождаются преобразованием их агрофизических свойств и состава органического вещества (Зейдельман, 2012). Для оценки степени деградации черноземов был предложен критерий по оптической плотности различных вытяжек из гумусового горизонта (Зейдельман, 2012; Зейдельман, 2013; Степанцова, 2011). Но он не использовался для оценки состояния почв в садах.

Объекты и методы

Цель работы: оценить влияние семилетней работы системы капельного полива яблоневого сада на агрофизические свойства и состав органического вещества типичного чернозема Тамбовской равнины и предложить критерий для оценки степени деградации почв.

Исследования проводились на территории ОАО «Дубовое» Петровского района Тамбовской области, расположенного на водораздельном пространстве рек Воронеж и Матыра в 10-12 летних насаждениях яблони. Для сравнения было выбрано 4 участка: 1 - сад в хорошем состоянии без орошения, 2- угнетенный сад на выровненном участке под 7-ми летней системой капельного орошения, 3-хороший сад на склоне под 7-ми летней системой капельного орошения, 4- выпад деревьев в понижении в саду без орошения.

Гранулометрический состав почвы определяли по Долгову и Личмоновой, плотность – режущими цилиндрами объемом 100 см³. МГ и НВ - по Николаеву, фракционный состав гумуса по Пономаревой и Плотниковой, критерий степени гидроморфизма черноземов - по оптической плотности щелочной и щелочной пирофосфатной вытяжек (Зейдельман, 2012).



Результаты

Фоновый типичный чернозем на неорошаемом участке сада характеризуются слабокислой реакцией верхних горизонтов и нейтральной - нижних, зернистой структурой, высокой пористостью по всему профилю (табл.1). Черноземовидные оподзоленные почвы замкнутых западин характеризуются сильнокислой реакцией всего профиля, повышенной плотностью и резкой элювиально-иллювиальной дифференциацией по илу. Неблагоприятные свойства и поверхностный застой влаги ведут к выпадению деревьев на таких участках.

Таблица 1 Агрофизические свойства

| Горизонт | Глубина, см | Плотность, г/см ³ | Пористость, % | МГ. % от массы | НВ, % от массы | Ил, % | Физическая глина, % | pH _{вод} | pH _{сол} |
|--|-------------|------------------------------|---------------|----------------|----------------|-------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 1. Чернозем типичный, неорошаемый участок | | | | | | | | | |
| Ап | 0-20 | 1,10 | 58,5 | 11,2 | 35,4 | 22-23 | 59-62 | 6,43 | 5,52 |
| А1 | 20-45 | 1,15 | 55,4 | 10,5 | 38,2 | | | 6,63 | 5,74 |
| Вса | 60-70 | 1,25 | 53,4 | 9,8 | 32,1 | 22-23 | 59-62 | 8,16 | 7,58 |
| 2. Чернозем типичный, капельное орошение | | | | | | | | | |
| Ап | 0-20 | 1,11 | 55,1 | 11,6 | 32,1 | 19-20 | 53-59 | 5,62 | 4,92 |
| Апп | 20-30 | 1,20 | 52,7 | 10,8 | 37,0 | | | 5,56 | 5,29 |
| А1 | 30-45 | 1,25 | 50,0 | 10,5 | 34,9 | | | 5,54 | 4,90 |
| Вса | 60-70 | 1,23 | 54,4 | 9,6 | 33,2 | 22-24 | 59-60 | 8,22 | 7,71 |
| 3. Чернозем оподзоленный, капельное орошение | | | | | | | | | |
| Ап | 0-20 | 1,17 | 52,2 | 9,7 | 39,8 | 18-19 | 53-54 | 5,33 | 4,88 |
| А1 | 20-50 | 1,19 | 57,6 | 10,0 | 44,0 | | | 5,84 | 5,11 |
| В | 70-100 | 1,29 | 51,1 | 10,7 | 36,6 | 34-35 | 63-64 | 5,36 | 4,18 |
| 4. Черноземовидная оподзоленная глееватая почва | | | | | | | | | |
| Ап.fs | 0-20 | 1,16 | 52,8 | 9,7 | 39,6 | 14-15 | 48-50 | 4,98 | 4,36 |
| А1 | 20-45 | 1,30 | 43,7 | 9,9 | 41,3 | | | 4,81 | 4,17 |
| Вg | 60-90 | 1,35 | 47,6 | 10,7 | 40,4 | 34-35 | 63-64 | 5,14 | 4,06 |

Капельное орошение сопровождается резким подкислением почвы. При затрудненном оттоке (разрез 2) увеличении кислотности наблюдается только в верхних 40 см, нижние горизонты профиля сохраняют свойства и карбонатность, характерную для типичного чернозема. В результате, складывается ситуация резкой смены в профиле реакции почвы с кислой на слабощелочную, что неблагоприятно сказывается на росте и развитии плодовых деревьев. При свободном оттоке (разрез 3) от карбонатов - отмывается метровая толща почвы. Кислая реакция почвы по всему профилю не оказывает негативного влияния на деревья.

Агрофизические свойства чернозема изменяются слабо, только полное вымывание карбонатов из верхней толщи (разрез 3) сопровождается увеличением плотности переходного горизонта и снижением пористости. Более глубокие изменения характерны для минеральной массы почвы. Под влиянием ферригации почва приобретает элювиально-иллювиальную дифференциацию по илу, подобную черноземным оподзоленным глееватым почвам в западинах. Морфологически это проявляется в разрушении структуры и появлении признаков осветления в нижней части гумусового и верхней части переходного горизонтов (табл.2).



Таблица 2 Состояние сада и морфологические характеристики почвы

| Состояние сада | Глубина вскипания | Структура гумусового горизонта | Признаки оподзоливания | Признаки оглеения | K _{г-п} |
|---|-------------------|--------------------------------|---------------------------|---|------------------|
| 1. Чернозем типичный, неорошаемый участок | | | | | |
| Отличное | 50-60 | зернистая | нет | нет | 1,25 |
| 2. Чернозем типичный, капельное орошение | | | | | |
| Угнетенное | 50-60 | комковато-глыбистая | нет | нет | 1,70 |
| 3. Чернозем оподзоленный, капельное орошение | | | | | |
| Хорошее | 120-150 | пылевато-мелкозернистая | скелетаны в горизонте A2B | нет | 3,12 |
| 4. Черноземовидная оподзоленная глееватая почва | | | | | |
| Выпад | не вскипает | глыбисто-призматический | скелетаны в горизонте A2B | ортштейны в Ap оглеенные кутаны в Bg | 6,65 |

Таблица 3. Фракционный состав гумуса

| Горизонт | С об, % | Фракционный состав, С, % от Соб | | | | | | | Сост | С _{ГК} С _{ФК} | С _{ГК(I)} С _{ГК(II)} |
|---|---------|---------------------------------|------|-----|-----|-------------------|------|------|------|------------------------------------|---|
| | | Фульвокислоты | | | | Гуминовые кислоты | | | | | |
| | | Ia | I | II | III | I | II | III | | | |
| 1. Чернозем типичный, неорошаемый участок | | | | | | | | | | | |
| Ap | 3,52 | 1,7 | 2,8 | 4,9 | 6,3 | 5,1 | 31,6 | 12,8 | 22,7 | 2,34 | 0,16 |
| A1 | 3,18 | 1,9 | 6,9 | 6,6 | 5,2 | 6,6 | 35,3 | 13,7 | 18,9 | 2,54 | 0,19 |
| 2. Чернозем типичный, капельное орошение | | | | | | | | | | | |
| Ap | 3,21 | 6,2 | 9,7 | 7,5 | 4,4 | 7,5 | 36,5 | 11,2 | 19,1 | 1,58 | 0,21 |
| App | 3,11 | 6,5 | 8,6 | 6,4 | 4,6 | 7,1 | 37,9 | 12,1 | 18,5 | 2,15 | 0,19 |
| A1 | 3,04 | 6,9 | 9,5 | 6,6 | 4,2 | 7,2 | 41,1 | 11,6 | 17,0 | 2,22 | 0,18 |
| 3. Чернозем оподзоленный, капельное орошение | | | | | | | | | | | |
| Ap | 3,52 | 6,2 | 7,9 | 4,5 | 4,2 | 14,9 | 35,9 | 11,8 | 16,6 | 2,24 | 0,42 |
| A1 | 3,04 | 7,8 | 10,4 | 4,3 | 4,3 | 18,6 | 28,9 | 19,5 | 14,1 | 2,22 | 0,64 |
| 4. Черноземовидная оподзоленная глееватая почва | | | | | | | | | | | |
| Ap fs | 3,32 | 7,0 | 8,7 | 4,9 | 6,2 | 27,7 | 25,2 | 9,9 | 15,1 | 1,97 | 1,10 |
| A1 | 3,08 | 8,7 | 9,6 | 3,6 | 3,2 | 34,4 | 25,5 | 11,0 | 12,9 | 2,78 | 1,35 |

Для типичного чернозема характерен гуматный состав органического вещества, в составе гуминовых и фульвокислот преобладает II фракция (табл. 3). Общее содержание органического вещества в черноземовидной оподзоленной глееватой почве несколько ниже чем в типичном черноземе. Среди фульвокислот более 50% составляют I и Ia фракции. Среди гуминовых кислот в пахотном горизонте доля I и II фракции, одинаковы. в подпахотном преобладает I фракция. При капельном орошении общее содержание органического вещества сохраняется на уровне типичного чернозема, но изменяется его фракционный состав. Увеличивается общее содержание фульвокислот, среди них преобладающими становятся I и Ia фракции. Среди гуминовых кислот возрастает доля I фракции. Изменение в фракционном составе органического вещества тем сильнее, чем ярче проявляются признаки оподзоленности почвы.



Значения критерия степени гидроморфизма черноземов на участках с капельным орошением возрастают по сравнению с его показаниями на неорошаемом типичном черноземе, но не достигают значений, характерных для заболоченной черноземовидной почвы (табл.1).

Таким образом изменения водного режима при капельном орошении сопровождаются преобразованием минеральной массы и органического вещества в направлении от типичного чернозема к черноземовидной оподзоленной глееватой почве. Количественным критерием этого процесса может служить критерий степени гидроморфизма черноземов ($K_{г-п}$).

Выводы

1. Капельное орошение в плодовых садах на типичных черноземах в условиях Тамбовской низменности может привести к значительной деградации свойств черноземов: подкислению почвы на 1-1,5 ед.рН, уплотнению нижних горизонтов, деградации зернистой структурой в комковато-призматическую.

2. Капельное орошение сопровождается значительной перестройкой минеральной массы почвы, которая проявляется в элювиально-иллювиальной дифференциации по илу, что не характерно для типичных черноземов.

3. При сохранении общего содержания органического вещества изменяется его фракционный состав: увеличивается содержание агрессивных фульвокислот I и Ia фракций, среди гуминовых кислот возрастает доля I фракции.

4. Критерий степени гидроморфизма черноземов можно использовать для ценки степени их деградации под влиянием капельного орошения.

Благодарность

Исследования проводились на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ.

Литература

1. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. Количественная диагностика степени гидроморфизма черноземов и черноземовидных почв (на примере почв севера Тамбовской равнины)// Деградация богарных и орошаемых черноземов под влиянием переувлажнения и их мелиорация. Москва: АПР, 2012. С. 196-209.
2. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н. Методы количественной диагностики степени гидроморфизма черноземовидных почв севера Тамбовской равнины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение, 2012, № 1
3. Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б.; Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения, способы защиты и мелиорации. Воронеж: Квартал, 2013 – 352с.
4. Красько М. А. Влияние способов капельного орошения на рост и продуктивность яблони в условиях зоны недостаточного увлажнения Ставропольского края// Плодоводство и виноградарство юга России. Краснодар, 2014. № 30 (06). С.95-105
5. Овчинников А.С., Бородычев В.В., Кучер Д.Е., Шуравилин А.В. Капельное орошение яблоневого сада интенсивного типа на дерново-подзолистых почвах Московской области// Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. Изд-во ВГАУ. Волгоград, 2016. №2 (42). С.211-220
6. Попова В.П., Фоменко Т.Г. Эффективность капельного орошения с применением минеральных удобрений в насаждениях яблони//Садоводство и виноградарство, Москва, 2009, №2. С.2-5.
7. Степанцова Л.В., Красин В.Н. Количественный показатель глубины залегания грунтовых вод в черноземовидных почвах севера Тамбовской равнины// Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. Мичуринск, 2011. № 2.С. 106-110.



УДК 631.41

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМАХ ТРАНСФОРМАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ

Д.Л.Пинский¹, Т.М. Минкина²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино,
Российская Федерация

pinsky43@mail.ru

²Кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов ЮФУ, Ростов-на-Дону

tminkina@mail.ru

TO THE QUESTION ABOUT THE MECHANISMS OF TRANSFORMATION AND ACCUMULATION OF
HEAVY METALS IN SOILS

D.L. Pinsky¹, T.M. Minkina²

¹Institute of Physico-chemical and Biological Problems in Soil Science Russian Academy of Sciences

²Department of Soil Science and Assessment of Land Resources at Southern Federal University

Annotation: The transformation of Cu, Pb and Zn technogenic compounds in soils is considered. The mechanisms of heavy metals accumulation due to adsorption, precipitation, formation of complexes with humic acids and ternary complexes Cu^{2+} with organic and mineral components, as well as heterovalent substitution of Al^{3+} on Cu^{2+} in octahedral structures of clay minerals were discussed.

Введение

К тяжелым металлам относится более 40 химических элементов с атомным весом более 50 а.е. Некоторые из них (Fe, Mn, Zn и др.) одновременно являются микроэлементами. Они входят в состав ферментов необходимых для нормального функционирования живых организмов. Другие признаны приоритетными загрязнителями биосферы, подлежащими первоочередному контролю, в том числе Cd, Cu, Pb и Zn. Это связано с их высокой технофильностью и прогрессивно растущим техногенным загрязнением окружающей среды и, особенно, почв. ТМ являются кумулятивными ядами. Многие из них относятся к первому и второму классам опасности.

С научной точки зрения поведение ТМ в почвах также представляет значительный интерес. В связи с особенностями строения электронных оболочек, они активно взаимодействуют с различными компонентами жидкой и твердых фаз почвы с образованием соединений координационного типа. Легко образуют малорастворимые соли, что создает проблемы с интерпретацией данных.

Целью настоящей работы является анализ известных и новых экспериментальных данных касающихся трансформации техногенных соединений ТМ и механизмов их аккумуляции в почвах.

Трансформация техногенных соединений ТМ в почвах

Известно, что основная масса ТМ поступает в окружающую среду в форме аэрозолей, состав которых зависит от источника выбросов и свойств металла. Как правило большую их часть составляют оксиды металлов, значительно меньшую сульфиды, фосфаты, водорастворимые соединения и нерастворимый остаток (Горбатов, Обухов, 1989). При этом трансформация соединений ТМ в почвах с образованием наиболее устойчивых форм начинается с необратимого перехода ионов ТМ в почвенный раствор и последующего



перераспределения их между другими эффективными фазами почвы (рис. 1). Поэтому, в отсутствие постоянного поступления аэрозолей в почву, они могут со временем полностью переходить в более стабильные для почвенных условий формы нахождения. Самоочищение почв от ТМ происходит, главным образом, за счет миграционных процессов, а период полувыведения их из почв зависит от свойств ТМ и почв: Zn – 70-510, Cd – 13-110, Cu – 310-1500, Pb – 740-5900 лет (Добровольский, 1983; Тэрыцэ, Валтер, 1988).

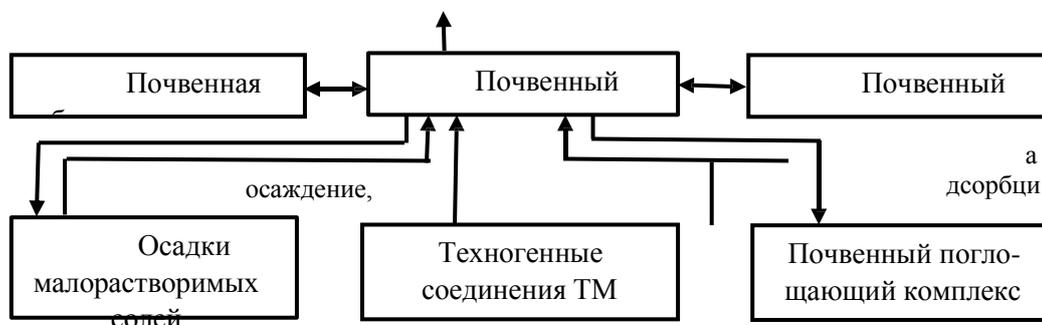


Рис. 1. Перераспределение тяжелых металлов между эффективными фазами почв

Адсорбция и осадкообразование

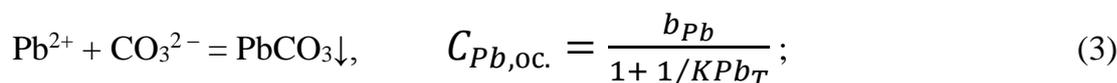
Взаимодействие ионов ТМ с почвенным поглощающим комплексом (ППК) принято описывать уравнениями изотерм адсорбции и ионного обмена. Существует множество различных уравнений адсорбции, из которых наиболее употребляемыми являются уравнение Фрейндлиха (1) и Ленгмюра (2):

$$C_{ВП} = K_{Ф} C_B^{1/n}, \quad (1)$$

$$C_{ВП} = \frac{C_{\infty}}{\left(1 + \frac{1}{K_L C_B}\right)}, \quad (2)$$

где $C_{ВП}$ – концентрация прглощенных катионов, C_B – концентрация противоионов в равновесном растворе, C_{∞} – максимальная адсорбция, $K_{Ф}$ и K_L – константы Фрейндлиха и Ленгмюра соответственно, $1/n$ – эмпирическая постоянная.

Уравнение Фрейндлиха является эмпирическим и описывает неограниченную адсорбцию. Уравнение Ленгмюра выведено, исходя из кинетических представлений о процессе и описывает ограниченную адсорбцию. Ионы ТМ адсорбируются компонентами ППК преимущественно по механизму специфической адсорбции за счет короткодействующих донорно-акцепторных или координационных связей с образованием поверхностных внутрисферных комплексных соединений. Однако, возможно образование поверхностных малорастворимых солей различного состава: гидроксидов, карбонатов гидроксикарбонатов, гидроксипироморфитов и др. (Пинский, Фиала, 1991). Этому способствует подщелачивание раствора вблизи поверхности некоторых минералов в результате протонирования их поверхности. Особенно это характерно для минералов группы каолинита и минералов Al и Fe. Можно показать, что образование осадков малорастворимых солей, например, $PbCO_3$, описывается уравнением аналогичным уравнению изотермы Ленгмюра:





где $C_{Pb,oc}$ – количество образовавшегося карбоната Pb, b_{Pb} – доля CO_3 в осадке на единицу массы почвы, Pb_T – общая молярная концентрация свинца в почвенном растворе, $K \equiv n_{CO_3}/K_{sp}V_w$, где n_{CO_3} – общее число молей, образующих осадок со свинцом; K_{sp} – произведение растворимости, V_w – объем раствора, литры.

Таким образом, соответствие изотермы адсорбции ТМ почвой уравнению Ленгмюра нельзя однозначно трактовать как результат физико-химической адсорбции. Это может быть как смешанный процесс (адсорбция-осадкообразование), так и осадкообразование в чистом виде (Garrison Sposito, 1984).

В почвах в сорбционных процессах участвует множество различных катионов и анионов. Показано, что при одновременном внесении в почву Cu, Pb и Zn в форме нитратных и ацетатных солей в результате взаимной конкуренции за сорбционные центры происходит изменение формы изотерм и параметров адсорбции (табл. 1).

Таблица 1. Значения параметров адсорбции катионов Cu^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} черноземом обыкновенным из растворов уксуснокислых и азотнокислых солей

| Катионы | Нитраты | | | Ацетаты | | |
|---------------------------------|------------------------|-------------|-------|------------------------|-------------|-------|
| | C_∞ мМ/100 г | K_L | R^2 | C_∞ мМ/100 г | K_L | R^2 |
| Моноэлементная адсорбция | | | | | | |
| Pb | 1.68±0.11 | 40.89±4.87 | 0,93 | 1.42±0.21 | 76.13±23.91 | 0.94 |
| Cu | 1.33±0.13 | 93.72±20.69 | 0,94 | 1.18±0.14 | 159.19±0.63 | 0.82 |
| Zn | 1.46±0.057 | 3.28±0.21 | ~1,00 | 2.26±0.60 | 6.96±2.75 | 0.99 |
| Полиэлементная адсорбция | | | | | | |
| Pb | 0.493±0.018 | 190.3±19,7 | 0.99 | 0.647±0.115 | 945.1±799.0 | 0.28 |
| Cu | 0.457±0.020 | 406.0±66,1 | 0.97 | 0.740±0.122 | 501.9±325.0 | 0.44 |
| Zn | 0.292±0.0053 | 231.4±13,8 | ~1.00 | 0.547±0.128 | 196.8±137.4 | 0.47 |

Из представленных данных видно, что при полиэлементной адсорбции усложняется форма изотерм и их соответствие уравнению Ленгмюра. Значения K_L значительно больше, чем в случае моноэлементной адсорбции. В то же время C_∞ при полиэлементной адсорбции уменьшаются. Однако сумма C_∞ всех катионов при полиэлементной адсорбции приблизительно равна средней величине максимальных адсорбций Cu, Pb и Zn в случае моноэлементного процесса. Следовательно, при полиэлементной адсорбции сродство ППК чернозема обыкновенного к каждому катиону ТМ возрастает за счет конкуренции, а максимальные адсорбции становятся меньше. При этом сумма величин C_∞ в случае полиэлементной адсорбции в пределах ошибки определения равна средней величине C_∞ для ионов Cu, Pb и Zn при моноэлементном поглощении. Кроме того, видно, что сопутствующий анион оказывает существенное влияние как на величины C_∞ , так и на значения K_L . Этот факт практически никогда не учитывается при изучении поглотительной способности почв.

Постсорбционная трансформация ТМ в почвах

Для выяснения более тонких особенностей взаимодействия поглощенных катионов ТМ с компонентами почв были использованы методы синхротронного излучения: анализ протяженной тонкой структура рентгеновского спектра поглощения (Extended X-ray Absorption Fine Structure, EXAFS) и околопороговой тонкой структуры спектров поглощения



(X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES). Анализ спектров свидетельствует о взаимодействии Cu^{2+} с гуминовой кислотой. При этом образуются октаэдрические внутрисферные координационные комплексы хелатного типа. Возможно также образование тройных комплексов, в которых центральную позицию занимает ион меди, связанный с органическими и минеральными компонентами. При взаимодействии ионов Cu^{2+} со слоистыми алюмосиликатами часть катионов встраивается в октаэдрические структуры, замещая ионы Al^{3+} и образует подобие внутрисферного комплекса. Можно также предполагать, что Cu^{2+} сорбируется как димер (Cu-Cu) силикатными и/или алюминиевыми группами, имеющими неполную координацию (Minkina et al., 2017; Pinskiy et al., 2018).

Заключение

Показано, что изотермы монокатионной адсорбции Cu, Pb и Zn, черноземом обыкновенным хорошо описываются уравнением Ленгмюра. В то же время процесс образования осадков малорастворимых соединений также может быть описан ленгмюроподобным уравнением, что затрудняет однозначную интерпретацию полученных результатов. В экспериментах по поликатионной адсорбции ТМ показано, что конкуренция за сорбционные места влияет на форму изотермы каждого катиона и прочность связи с адсорбентом. В то же время суммарные значения $S_{\text{макс}}$ катионов, участвующих в поликатионной адсорбции в пределах ошибки определения соответствуют средним значениям $S_{\text{макс}}$ при моноэлементной адсорбции каждого катиона. Методами XAFS показана возможность образования октаэдрических внутрисферных комплексов хелатного типа с гуминовыми кислотами (ГК) почв и тройных комплексов, где Cu^{2+} связан с органическими и минеральными компонентами. Ионы Cu^{2+} могут замещать ионы Al^{3+} в октаэдрических структурах глинистых минералов с образованием подобия внутрисферного комплекса.

Благодарности

Работа выполнена по теме Государственного задания № АААА-А18-118013190180-9.

Литература

- Горбатов В.С., Обухов А.И. (1989) Динамика трансформации малорастворимых соединений цинка, свинца и кадмия в почвах // Почвоведение. **6**. 129-133.
- Добровольский В. В. (1983) География микроэлементов: глобальное рассеяние // М.: Мысль. 272.
- Пинский Д.Л., Фиала К. (1991) Химия тяжелых металлов в окружающей среде // В кн.: «Загрязняющие вещества в окружающей среде» (ред. Моцик А., Пинский Д.Л.). Пушино-Братислава. 115-138.
- D. L. Pinskiy, T. M. Minkina, T. V. Bauer, D. G. Nevidomskaya, S. S. Mandzhieva, M. V. Burachevskaya. (2018) Copper Adsorption by Chernozem Soils and Parent Rocks in Southern Russia *Geochemistry International*, **56** (3), 266–275. DOI: 10.1134/S0016702918030072
- Тэрыцэ К. В., Валтер П. (1988) Некоторые вопросы количественной оценки влияния тяжелых металлов на биологическую активность почв // Экология, **2**, 12-18.
- Garrison Sposito. (1984) *The Surface Chemistry of Soil*. Oxford University Press New York. 245.
- Minkina Tatiana M., Pinskiy David L., Bauer Tatiana V., Nevidomskaya Dina G., Mandzhieva Saglara S., Sushkova Svetlana N. (2017) Sorption of Cu by chernozems in southern Russia // *Journal of Geochemical Exploration*. **174**, 107–112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.002>



УДК 631.41

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ ГИДРОМОРФНОГО ЗАСОЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЯРОСЛАВСКОГО ПОВОЛЖЬЯ

Симонова Ю.В., Русаков А.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
uvsim@yandex.ru

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOILS AFFECTED BY HYDROMORPHIC SALINIZATION
(THE YAROSLAVL VOLGA REGION AS THE EXAMPLE)

Simonova J.V., Rusakov A.V.

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Annotation: The relationships between the electrical resistivity and the properties of semi-hydromorphic and hydromorphic saline soils forming in a humid climate were established. The salinity factor turned out to be the most significant for the value of electrical resistivity in comparison with the particle size distribution, hygroscopic moisture and organic matter.

Введение

Показатель удельного электрического сопротивления (УЭС) используется в почвоведении и грунтоведении прежде всего для выявления неоднородностей по какому-либо фактору (параметру). Такими факторами могут быть гранулометрический и литологический состав отложений и почв, пористость, влагонасыщенность, минерализация почвенно-грунтового раствора и др. Пространственные неоднородности по этим параметрам успешно диагностируются с помощью методов вертикального электрического зондирования и горизонтального электрического профилирования. В то же время мультифакторность показателя УЭС, то есть его зависимость от большого числа факторов, которые при отсутствии резкой контрастности последних выделяются с трудом, составляет проблему почвенной электрофизической диагностики.

На более высоком уровне разрешения, таком как почвенный разрез, градации фактора, которые возможно зафиксировать, могут быть менее контрастными, а соответствующее варьирование изучаемого признака более заметно в электрическом профиле почвы. Измерение истинного УЭС в почвенной пасте, кроме того, позволяет абстрагироваться от влияния полевой влажности в момент измерения.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке зависимости УЭС, изучаемого на уровне профиля, от базовых свойств почвы с учетом особенностей ее генезиса, предусматривающего наличие одновременно нескольких параметров, каждый из которых способен принципиально повлиять на электрофизическую характеристику почвы: глеевый процесс, интенсивное накопление органического вещества, гидроморфное засоление.

Объекты и методы

Исследовано 17 разрезов гидроморфных и полугидроморфных почв на территории Ярославского Поволжья, в том числе в Ростовском, Пошехонском и Некрасовском административных районах. Измерения в поле и отбор образцов проводились в июне 2017 г.

Электрические параметры почвы — кажущееся (ERa) и истинное (ERt) УЭС — измерялись с помощью портативного прибора LandMapper. Измерение ERa проводилось в полевых условиях при естественной влажности на глубину почвенного среза: по 6 измерений



в каждом горизонтальном слое через каждые 5 см по вертикали, значения в дальнейшем усреднялись на мощность генетического горизонта. Величины E_{Rt} измерялись в кювете с площадными электродами в свежих образцах почвы из каждого генетического горизонта, насыщенных дистиллированной водой до состояния пасты. Измерение E_{Rt} проводилось не менее чем в пятнадцатикратной повторности. В почвенных образцах определялось содержание Сорг на CHN-анализаторе, гранулометрический состав — по Качинскому, содержание легкорастворимых солей — на основании данных анализа водной вытяжки почвы (1:5). Разрезы анализировались на глубину почвенного профиля с учетом генетических горизонтов до уровня стояния ГВ и ниже. Всего из 17 разрезов по вышеуказанным показателям проанализировано 86 образцов. Для анализа полученных данных применялись методы статистической обработки экспериментальных дат. Объем выборки равен 86.

Результаты и обсуждение

Изученные почвенные разрезы представлены отделами органо-аккумулятивных, глеевых и аллювиальных почв, среди которых имеются стратифицированные и постагрогенные подтипы. Почвы характеризуются близким залеганием грунтовых вод и наличием признаков оглеения, по крайней мере в нижней части профиля. Особенностью грунтовых вод выбранных объектов исследования является их высокая степень минерализации (1–14 г/л), что в результате контакта с почвенной толщей приводит к гидроморфному засолению последней. В литологическом отношении породы, на которых сформированы изученные почвы, представлены отложениями озерно-ледникового и аллювиального генезиса. В гранулометрическом составе наблюдается разнообразие — от супесей до глин. Тектурная дифференциация, обусловленная педогенезом, в профиле выражена слабо и в основном обязана литологическим неоднородностям. По гранулометрическому составу выделяются три типа: 1 — с преобладанием фракций мелкого песка и крупной пыли, 2 — с абсолютным преобладанием песчаных фракций, 3 — с преобладанием песчаных фракций и крупной пыли. По концентрации солей в основном распространены переувлажненные почвы слабой и средней степени засоления, но встречаются и сильнозасоленные разности. В качестве фоновых рассмотрены почвы с содержанием солей 0.1 % и менее, которые также были включены в выборку.

Статистическая характеристика количественной изменчивости выборки из 86 образцов исследованных почвенных разрезов показала, что в ряду E_{Rt} разброс данных находится в пределах диапазона 0.37–47.11 Ом·м, при среднем значении 15.13 и медиане 10.05 Ом·м. Рассмотренные почвы также значительно различаются по сумме легкорастворимых солей 0.02–2.93 %, при среднем значении 0.28 и медиане 0.16 %. Неоднородность дисперсий по выборкам (касается содержания солей, выражаемого в %) устранялась с помощью преобразования Фишера, после чего определялось их варьирование. Межиндивидуальное варьирование выборки как по признаку E_{Rt} , так и по содержанию солей сильное. Коэффициенты вариации — 79.6 и 75.3 %, соответственно.

Для наглядного изображения пространственной, профильной и внутрииндивидуальной вариабельности электрофизической характеристики данные E_{Rt} верхних (гумусовых) и нижних (глеевых G и глееватых Cg) горизонтов профиля всех исследованных почв, измеренные в кювете, представлены в виде «ящичковой» диаграммы размаха на рис. 1.

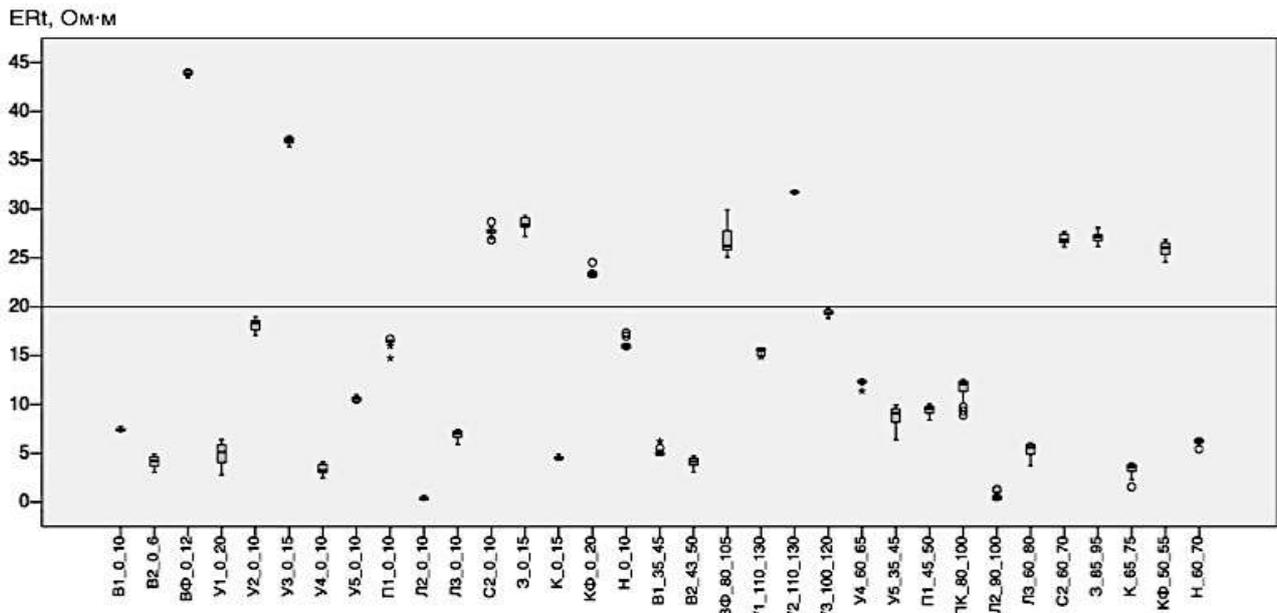


Рис. 1. Диаграмма размаха величин E_{Rt} верхних (гумусовых) и нижних (глеевых G и глееватых Cg) горизонтов. Концы «усов» — минимальное и максимальное из показаний по отдельному образцу; границы ящика — 1-й и 3-й квартили; линия в ящике — медиана по выборке из значений E_{Rt} по каждому образцу. По оси X обозначены № разрезов.

В 59 из 86 исследованных образцов значения УЭС в кювете не превышают 20 Ом·м (опорная линия по оси Y на графике рис. 1). В этих образцах содержание солей составляет более 0.15 %. При увеличении содержания солей свыше 0.5 % электрофизическая характеристика почвы реагирует резким снижением УЭС, показатель E_{Rt} при этом не превышает 10 Ом·м. Необходимо отметить, что встречались образцы, где при не высоком содержании солей УЭС оставалось низким и, следовательно, должно быть объяснено причинами, напрямую не связанными с засолением.

Анализ показаний прибора ряда из 15–30-кратной повторности по каждому отдельному образцу выявил невысокую долю образцов (7 из 86 измеренных), где наблюдался сильный разброс данных E_{Rt} (коэффициент внутрииндивидуальной вариации составил более 20 %). Между внутрииндивидуальным варьированием при измерении в кювете и содержанием Сорг нами была определена достоверная прямая корреляционная связь средней силы ($R=0.55$), тогда как с показателями гранулометрического состава, гигроскопической влажностью и содержанием солей такой связи обнаружено не было.

Для демонстрации межиндивидуальных и внутрииндивидуальных различий E_{Ra} выбраны и представлены в виде диаграммы размаха на рис. 2 данные, полученные в верхних (гумусовых) и нижних (глеевых G и глееватых Cg) горизонтах профиля ненарушенного сложения. В 38 случаях из всего объема выборки наблюдался значительный разброс показаний прибора в пределах одного горизонта, внутрииндивидуальное варьирование превысило 20 %. Его связь ни с одним из исследованных показателей статистически не подтверждается. Тем не менее, сопоставляя данные полевого морфологического анализа с внутрииндивидуальным варьированием показателя E_{Rt} , складывается впечатление, что оно обусловлено собственно неоднородностью генетических горизонтов: для гумусовых горизонтов — наличием антропоморфных включений, аллохтонного материала, слабооземленной частью почвы на контакте с дерниной, присутствием фрагментов



негумифицированного органического вещества, для минеральных горизонтов — линзовидным залеганием и слоистостью отложений.

Ряд значений E_{Ra} всех изученных почв изменяется в диапазоне 0.83–71.63 Ом·м, при среднем значении 16.34 и медиане 10.93 Ом·м. Коэффициент межиндивидуального варьирования близок к таковому у E_{Rt} и равен 72.86 %.

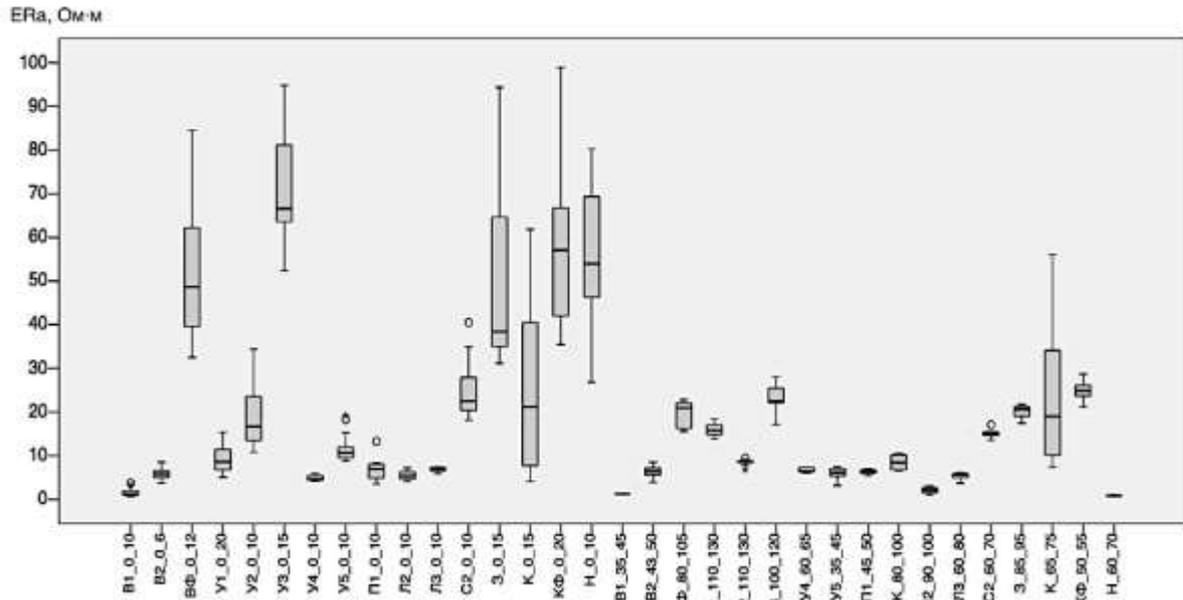


Рис. 2. Диаграмма размаха величин E_{Ra} верхних (гумусовых) и нижних (глеевых G и глееватых Cg) горизонтов. Концы «усов» — минимальное и максимальное из показаний по каждому генетическому горизонту профиля; границы ящика — 1-й и 3-й квартили; линия в ящике — медиана по выборке из значений E_{Ra} по каждому горизонту. По оси X обозначены № разрезов.

Наиболее высокие значения УЭС (более 20 Ом·м) в основном характерны для почв, которые выбирались нами как фоновые относительно участков засоления, и где сумма солей составила не более 0.1 %. Между тем диапазоны 20–47.11 для истинного и 20–71.63 Ом·м для кажущегося УЭС достаточно низкие даже для фоновых почв и находятся в интервале, который может быть результатом других причин, не связанных с засоленностью. Например, суглинистые и глинистые почвы и породы, где близко к поверхности залегают грунтовые воды, могут иметь УЭС 30–50 Ом·м, торфяные горизонты — до 3 Ом·м (Полевая электрофизика, 2001). Другой особенностью изученных почв можно отметить развитие типичных признаков гидроморфизма, сопровождаемых реакциями восстановления железа. В то время как в аридных гидроморфных солончаках эти признаки стерты за счет высокой концентрации солей и низкого содержания органического вещества, а УЭС обусловлено в первую очередь солесодержанием (Электрофизика почв, 2004), в почвах гумидного климата глеевый процесс сам по себе способен занижать УЭС до 30–50 Ом·м (Pozdnyakov, 2008). В отличие от окисных форм присутствие закисных (подвижных форм) железа в форме органокомплексов и минеральных железистых солей способствует увеличению количества ионов-переносчиков заряда (Электрофизика почв, 2004). При этом существование одновременно нескольких факторов (тяжелого гранулометрического состава, гидроморфизма, аккумуляции органического вещества, засоления и др.), потенциально влияющих на электрические параметры почвы, не гарантируют проявлений в отношении величины УЭС ни синергизма, ни антагонизма.

Для выявления базовых свойств почвы, определяющих в нашем случае величину УЭС



(истинного и кажущегося), составлена матрица корреляций (табл. 1).

Таблица 1. Матрица корреляций

| Параметр | ERt | ERa | Физ. глина | Гигр. влажн. | pH | Сорг | Сумма солей |
|--------------|----------|----------|------------|--------------|---------|---------|-------------|
| ERt | 1 | 0.754** | 0.148 | -0.320** | -0.262* | -0.275* | -0.571** |
| ERa | 0.754** | 1 | 0.061 | -0.317** | -0.199 | -0.129 | -0.501** |
| Физ. глина | 0.148 | 0.061 | 1 | 0.235* | 0.085 | 0.158 | -0.097 |
| Гигр. влажн. | -0.320** | -0.317** | 0.235* | 1 | 0.063 | 0.377** | 0.797** |
| pH | -0.262* | -0.199 | 0.085 | 0.063 | 1 | 0.067 | 0.027 |
| Сорг | -0.275* | -0.129 | 0.158 | 0.377** | 0.067 | 1 | 0.422** |
| Сумма солей | -0.571** | -0.501** | -0.097 | 0.797** | 0.027 | 0.422** | 1 |

** Корреляция значима на уровне 0.01 (2-сторон.); * Корреляция значима на уровне 0.05 (2-сторон.).

Рассчитанные коэффициенты корреляции говорят о сложной взаимосвязи величины УЭС с физико-химическими параметрами почвы. На плоходренлируемых элементах рельефа гумидной зоны влажность гидроморфных и полугидроморфных почв в начале лета находится в диапазоне слабого влияния влажности на величину УЭС (Полевая электрофизика, 2001). Этим обстоятельством может быть обусловлена высокая корреляционная взаимосвязь ($R=0.75$) между величинами ERa, измеренными в увлажненной до верхнего предела текучести почве, и ERt, измеренными при естественной влажности в поле. Тем не менее, для ERt не может быть исключено влияние потери контактов при нарушении сложения почвы, а в случае ERa — неоднородности почвенной толщи в пределах горизонта (о чем также свидетельствует высокая доля почвенных разрезов с сильным внутрииндивидуальным варьированием в пределах горизонта), что объясняет различие как средних, так и крайних значений ERt и ERa. Как правило, в литературе по почвам гумидной зоны часто встречаются данные о тесной связи величины кажущегося и истинного УЭС с содержанием физической глины. Нашими данными такой зависимости установлено не было. Значимые коэффициенты корреляции слабой силы были установлены для гигроскопической влажности, величины pHвод (при ее обратном логарифмировании) и Сорг. Значимая корреляция средней силы ($R=0.57$) была показана для содержания солей.

Выводы

1. для гидроморфных и полугидроморфных почв Ярославского Поволжья разной степени засоления установлена корреляционная зависимость средней силы УЭС от содержания солей. Значимые, но слабые связи установлены с Сорг, pHвод, гигроскопической влажностью. С содержанием физической глины значимой связи не установлено.

2. внутрииндивидуальное варьирование электрических параметров ERt и ERa зависит от разных причин. Одним из статистически значимых факторов варьирования ERt является количество Сорг. Варьирование ERa при измерении в пределах горизонта определяется морфологической неоднородностью почвенной толщи.

Литература

- Поздняков А.И. (2001). *Полевая электрофизика почв*. 187 с.
 Поздняков А.И., Позднякова А.Д. (2004). *Электрофизика почв*. 48 с.
 Pozdnyakov A.I. (2008). Electrical parameters of soils and pedogenesis. *Eurasian Soil Science* 41(10), 1050–1058. <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1064229308100062>.



УДК 631.45

АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ И ПОИСК МЕТОДОВ АЛЛЕЛОМЕЛИОРАЦИИ

Федотов.Г.Н.¹, Горепкин И.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
gennadiy.fedotov@gmail.com

THE SOIL ALLELOTOXICITY AND SEARCHING FOR ALLELOMELIORATION METHODS
Fedotov G.N., Gorepekin I.V.
Soil Science Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The results of experiments on the possible reducing the negative impact of soil allelopathy for cereals are presented. Received data show that soil allelopathy can be reduced by using a structural transition in the humus matrix of soil gels or by increasing in soils the number of microorganisms groups consuming allelopathins.

Существование аллелопатического почвоутомления (аллелотоксичности почв) и его негативное влияние на развитие растений известно довольно давно. Оно обусловлено накоплением в почве аллелотоксинов из-за ее высокой сорбционной способности.

Наличие у почв аллелотоксичности является одним из главных факторов, во многих случаях ограничивающих выращивание сельскохозяйственных растений и сбор высоких урожаев. В этой связи проблема снижения аллелотоксичности почв является чрезвычайно важной для сельского хозяйства. Однако уделяют ей мало внимания. Аллелотоксичность почв не контролируют, полагая, что применение севооборотов гарантирует ее снижение ниже критического уровня.

Целью работы были проверка существования способов снижения аллелотоксичности почв и изучение природы ее снижения для почв Русской равнины.

Исследования проводили на семенах яровой пшеницы (*Triticum*) сорта Лиза, озимой пшеницы (*Triticum*) сорт Безенчукская 380, озимого тритикале (*Triticosecale*) сорт Немчиновский 56, ярового ячменя (*Hordeum*) сортов Нур и Раушан и озимой ржи (*Secale cereale*) сорт Татьяна.

В работе использовали образцы дерново-подзолистой почвы из окрестностей поймы р. Яхромы влажностью 18.1% (после зерновых), серой лесной почвы из Тульской области (Щекинский район) влажностью 21.6% (после зерновых), а также чернозема типичного из Липецкой области (Данковский район) влажностью 33.1% (после картошки).

Было изучено влияние различных воздействий на изменение длины проростков 7,5 г семян (~200 шт) при их прорастании в различных почвах. Длину проростков определяли, используя экспресс-метод, основанный на существовании линейной зависимости между насыпным объемом проросших семян в воде и длиной их проростков (Федотов и др., 2019). Проросшие в образцах почв семена отмывали от субстрата и помещали порциями в мерный цилиндр на 100 мл с водой, размещенный на вибростол, колеблющемся с частотой 50 Гц. После помещения каждой порции проросших семян в цилиндр, которые создавали ажурную пористую структуру, на них на 15-20 секунд помещали небольшой грузик массой 8 г в виде резиновой пробки, что приводило к уплотнению структуры. После помещения всех проросших семян в цилиндр на них ставили грузик и проводили дополнительное уплотнение структуры легкими постукиваниями (30-40) цилиндра с семенами о стол. Все перечисленные



операции позволяли создать достаточно однородную структуру, а нижняя граница груза позволяла определять насыпной объем с точностью до 0.5 мл.

При проведении экспериментов по проращиванию семян на дно чашки диаметром 95 мм помещали 30 г почвы, затем ровным слоем размещали 7.5 г семян, а сверху – 30 г почвы. После этого в чашку равномерно добавляли из мерной пипетки воду в количестве, обеспечивающем оптимальные водно-воздушные условия прорастания семян. Использовали шестикратную повторность с последующей статистической обработкой результатов. В связи с использованием в одном опыте 1000-1200 семян удавалось минимизировать ошибку, связанную с разнокачественностью семян. В результате ошибка опыта не превышала 7% при 95% доверительной вероятности. Изменение токсикоза обработанных почв проводили относительно исходных почв.

Для обработки почв промораживанием образцы почв помещали в морозильную камеру при -22°C на 8 суток. Оттаивание образцов проводили при комнатной температуре. Автоклавирование образцов почв проводили в стеклянных колбах с ватными пробками в течение 20 минут при температуре 132°C и давлении 2 атм.

Молочную сыворотку с навозом вносили в почву в виде тщательно перемешанной суспензии при соотношении компонентов 800 : 80 : 24 – почва : сыворотка : навоз соответственно.

После внесения добавок тщательно перемешивали почвенные образцы и оставляли на необходимое время. Перед измерением почву с внесенными добавками подсушивали на воздухе до исходной влажности.

Для снижения количества живых микроорганизмов суспензию молочной сыворотки с навозом обрабатывали 5 минут ультразвуком на УЗ диспергаторе МЭФ 91.1 (ООО «МЭЛФИЗ – ультразвук»).

Результаты выражали в процентах стимуляции прорастания семян и развития их проростков в обработанных образцах почв по сравнению с контрольными образцами.

Из полученных данных следует, что автоклавирование почвенных образцов приводит к заметному снижению аллелотоксичности почв. При этом известкование почв не оказывают заметного влияния на величину аллелотоксичности, а промораживание на дерново-подзолистых почвах приводит к ее достоверному увеличению.

Большой интерес представляло изучение снижения концентрации аллелотоксинов за счет активации почвенных или внесенных в почву микроорганизмов, так как этот путь наиболее реален для внедрения. Активацию почвенных микроорганизмов уже существующих в почвах можно проводить, пропуская через почву электрический ток небольшой величины.

Из полученных данных следует, что обработка дерново-подзолистой почвы постоянным электрическим током приводит к незначительному снижению аллелотоксичности.

Значительно более перспективным выглядит снижение аллелотоксичности почв за счет внесения в них микроорганизмов, в частности, с навозом (Гродзинский и др., 1979). Поэтому была изучена кинетика изменения аллелотоксичности почв при внесении в них навоза, молочной сыворотки и их смесей. Из полученных данных следует, что максимальное снижение ингибирующей способности почв происходит через 2 недели после внесения в них содержащих микроорганизмы препаратов. Причем максимальный эффект на всех изученных почвах наблюдался для смеси навоза КРС с молочной сывороткой. Отметим, что на серой лесной почве прослеживается проявление синергизма – эффект от совместного внесения навоза КРС с молочной сывороткой примерно в 1,5 раза выше суммы эффектов от внесения в почву навоза и сыворотки.



Обращает на себя внимание то, что на всех изученных почвах после достижения максимального снижения аллелотоксичности, наблюдаемой через 2 недели, начинается рост ингибирующей способности почв. Для дерново-подзолистой почвы он происходит заметно быстрее, чем для чернозема и серой лесной почвы.

Для проверки влияния именно живых микроорганизмов на снижения почвенной аллелотоксичности внесли в почву суспензию навоза КРС в молочной сыворотке после обработки суспензии в течение 5 минут ультразвуком, снижающей численность живых микроорганизмов. В результате эффект детоксикации почвенного образца уменьшился почти в 3 раза.

Было также изучено влияние количества внесенного препарата (суспензии навоза КРС в молочной сыворотке) на снижение аллелотоксичности почв. Обнаружено, что величина эффекта детоксикации прямо пропорциональна количеству внесенного препарата.

Данные, полученные при изучении влияния автоклавирования почв на снижение их аллелотоксичности, нельзя объяснить разложением при повышенной температуре молекул аллелотоксинов, так как эти молекулы в воде при автоклавировании не разрушаются. Можно предположить, что при автоклавировании почвенных образцов происходит структурная перестройка органо-минеральной матрицы почв (структурный переход) (Федотов и др., 2014) с увеличением энергии связи аллелотоксинов с этой матрицей. Это объяснение подтверждается ростом аллелотоксичности в замороженных почвах. Дополнительным подтверждением влияния именно структурного перехода на снижение аллелотоксичности при автоклавировании является заметно большая аллелотоксичность водных вытяжек из воздушно-сухих почв по сравнению с водными вытяжками из влажных почв.

Можно также попытаться объяснить наблюдаемое при автоклавировании почв снижение их аллелотоксичности гибелью при такой обработке подавляющего числа почвенных микроорганизмов. После этого они начинают активно развиваться, используя аллелотоксины в качестве источника углерода. Однако проведенная проверка по обработке почв пероксидом водорода, которая тоже должна была вызвать массовую гибель микроорганизмов не подтвердила эту гипотезу – аллелотоксичность почв не снизилась.

Сильное влияние УЗ обработки суспензии навоза в молочной сыворотке на снижение аллелотоксичности почв при обработке их этой суспензией (уменьшение детоксицирующего эффекта) подтверждает ведущую роль живых микроорганизмов в снижении аллелотоксичности почв. По-видимому, внесение в почвы вместе с навозами или молочной сывороткой питательных и биологически активных веществ играет в этом случае второстепенную роль. Также подтверждает роль живых микроорганизмов снижение эффекта детоксикации почв пропорциональное снижению количества вносимых в почву живых микроорганизмов – суспензии навоза КРС с сывороткой.

Совокупность полученных данных по кинетике детоксикации почв после внесения в них суспензий навоза в воде и молочной сыворотке позволяет предположить, что внесенные в почвы микроорганизмы, содержащиеся в навозах и молочной сыворотке, либо погибают за две недели, либо теряют свою способность потреблять аллелотоксины. Рост же аллелотоксичности почв, наблюдающийся через две недели, по-видимому, обусловлен поступлением аллелотоксинов в ту энергетическую область их связывания, из которой они могут переходить в развивающиеся семена. Наличие подобного процесса в дерново-подзолистой почве и его заметно меньшая его величина, характерная для чернозема и серой лесной почвы, по-видимому, объясняются большей энергией активации структурного перехода в гумусовой матрице почвенных гелей для чернозема и серой лесной почвы.

Таким образом, снижать аллелотоксичность почв можно двумя способами:



- используя структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и обеспечивая закрепление аллелотоксинов в почвах;
- увеличивая в почвах количество микроорганизмов, использующих аллелотоксины в качестве источников углерода.

Литература

1. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф и др. (2019) Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // Почвоведение, №4, 489-496.
2. Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головки Э.А. и др. (1979) Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наук. думка, 248 с.
3. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И. и др. (2014). Структурный переход в гумусой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв // Почвоведение, №9, 1056-1067.



УДК 631.4

КРИВЫЕ УСАДКИ МОНОЛИТОВ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ СОЛОНЦОВ СЛИТИЗИРОВАННЫХ

Хитров Н.Б., Роговнева Л.В.

Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
khitrovn@gmail.com

SHRINKAGE CURVES OF MONOLITHS FROM GENETIC HORIZONS OF VERTIC SOLONETZ
Khitrov N.B., Rogovneva L.V.
Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

Abstract: Statistical cumulative distributions of indices for shrinkage curve of 324 monoliths from Vertisols and Vertic Solonetz are created. Natric and vertic horizons have similar range of shrinkage indices, with that natric ones have higher values of pore volume weakly changed during water evaporation and lower bulk density at shrinkage limit.

Введение

Солонцы слитизированные (Vertic Solonetz по WRB-2014) – группа почв, сочетающая признаки солонца в верхней части и слитозема (Vertisol) в нижней части одного почвенного профиля. Верхняя часть представлена надсолонцовым (солонцово-элювиальным) гор. SEL и солонцовым гор. BSN (или ASN). В средней части с глубины 40-70 см появляются мелкие разнонаправленные поверхности скольжения (сликенсайды) и, чуть глубже, вертикальный гор. V. Обычно в средней части наблюдаются выделения карбонатов и аккумулируются легкорастворимые соли.

Для двух групп почв: Vertisols, Solonetz, - характерны явления набухания при увлажнении и усадки при высыхании. В литературе имеется информация о набухании-усадке в Vertisols (Ahmad, Mermut, 1996; Coulombe et al., 1996; Хитров, 2003; Kishne et al., 2009; Somasundaram et al., 2018) и редко в солонцах (Грачев, Корнблум, 1982). Возможные различия физических свойств солонцовых и вертикальных горизонтов не обсуждались. Существуют разные модели описания усадки почв (Cornelis et al., 2006; Chertkov, 2015; Leong, Wijaya, 2015). Их полезно использовать при решении задачи сравнения кривых усадки разных генетических горизонтов глинистых почв: Vertisols и Vertic Solonetz.

Объекты и методы

Исследовано 324 монолита из разных генетических горизонтов 26 почвенных профилей Pellic Vertisols (Stagnic) с разным содержанием солей, обменного натрия и карбонатов, Vertic Solonetz (Clayic), Haplic Solonetz (Albic, Loamic, Cutanic, Differentic), Vertic Stagnosols (Clayic), Vertic Chernozems (Clayic). Регионы распространения изученных почв: Окско-Донская низменность (Панинский р-н, Воронежская обл.), северные склоны Калачской возвышенности (Каменная Степь, Таловский р-н, Воронежская обл.), Приволжская возвышенность (Пензенская обл., Тамбовская обл., Самарская обл.), 2-я хвалынская терраса Волги (Саратовская и Волгоградская области), Волго-Ахтубинская пойма (Астраханская обл.), Янкульская депрессия (Ставропольский край), морская пластовая равнина Керченского полуострова.

Плотность почв определяли в полевых условиях буром с объемом режущего цилиндра 212 см³ (диаметр 8.21 см, высота 4.00 см) в пятикратной повторности по генетическим



горизонтам. Отбор монолитов, вырезанных такими цилиндрами, проводили в период сравнительно сильного естественного увлажнения почв при отсутствии трещин. Это позволяло получить кривую усадки, включающую линейный диапазон уменьшения объема монолита при уменьшении влажности (нормальную усадку), переходное состояние и предел усадки.

Усадку монолитов определяли в лабораторных условиях путем медленной сушки в закрытых картонных коробках малого объема при ежедневном измерении веса образца (погрешность 0.01 г) и геометрических параметров цилиндрического монолита штангенциркулем (цена деления по нониусу 0.1 мм). Диаметр измеряли в шести позициях при повороте образца на 30 градусов, высоту – в четырех позициях. Объем образца вычисляли по средним значениям диаметра и высоты, влажность – по обратной кривой потери массы после окончательной сушки при 105°C.

Кривые усадки строили в двух вариантах: (1) плотность как функция влажности; (2) поровое отношение (void ratio) как функция влажностного отношения (moisture ratio). Поровое отношение (void ratio) (e) – это отношение объема пор к объему твердой фазы. Влажностное отношение (moisture ratio) (θ) – это отношение объема воды к объему твердой фазы (Cornelis et al., 2006).

Для характеристики кривых усадки определяли: (1) плотность, влажность, поровое (e_f) и влажностное (θ_f) отношение исходного монолита при отборе в поле; (2) коэффициенты (a , b) уравнения линейной регрессии $e = a + b \theta$ участка нормальной усадки; (3) поровое отношение $e(\theta=0.8)$ при $\theta=0.8$ путем расчета по уравнению регрессии; (4) величину $e_{air}(0.8)$ как отношение объема пор, занятых воздухом, к объему твердой фазы при влажностном отношении $\theta=0.8$, соответствующем приблизительно верхней четверти диапазона линейной (нормальной) усадки монолита, $e_{air}(0.8) = \{e(\theta=0.8)\} - 0.8$; (5) плотность и поровое отношение $e(\theta=0)$ в сухом состоянии ($\theta=0$); (6) влажностное отношение θ_{shr} предела усадки путем решения обратной задачи $\theta = a' + b' e$ при значении $e(\theta=0)$.

Все параметры с их статистиками были объединены в базу данных. Монолиты группировали по названиям почв (указаны выше) и горизонтам. Для трех групп горизонтов (1 - верхние без признаков элювиирования, солонцеватости и сликенсайдов; 2 - солонцовые и солонцеватые; 3 - срединные и нижние со сликенсайдами) получены эмпирические статистические кумулятивные распределения. Обработка данных выполнена в Excel.

Результаты и обсуждение

Распределение плотности почв по профилю солонцов слитизированных из разных ареалов при естественной сравнительно высокой влажности (30-40%(мас)) не является одинаковым. Нижние горизонты, имеющие поверхности скольжения, характеризуются довольно узким диапазоном варьирования плотности во влажном состоянии от 1.30-1.35 до 1.40-1.48 г/см³. Напротив, в солонцовых горизонтах наблюдается широкий разброс значений и в пределах одного разреза, и в их совокупности в особенности. Общий диапазон варьирования плотности солонцовых горизонтов при влажности 28-40%(мас) – от 1.0 до 1.5 г/см³.

Все горизонты Vertic Solonetz и Vertisols характеризуются заметной усадкой при высыхании. На рис. 1 представлен пример кривых усадки для четырех горизонтов Vertic Solonetz (разр. V-920, Каменная Степь). В высохшем состоянии плотность монолитов из горизонтов, имеющих поверхности скольжения (сликенсайды), увеличивается до значений, близких к предельным – 1.85-1.95 г/см³, в монолитах из солонцовых горизонтов также увеличивается, но, не превышая 1.65-1.80 г/см³.

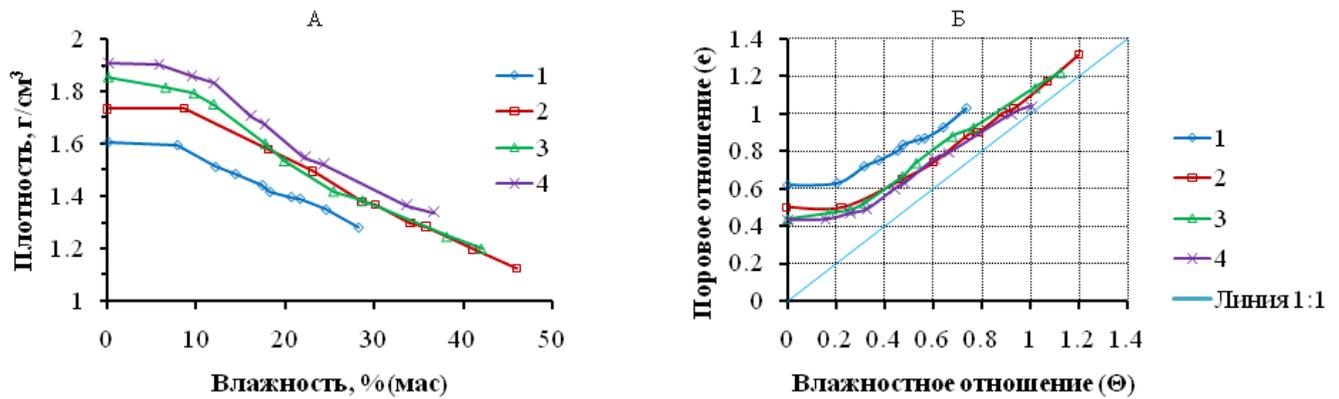


Рис. 1. Зависимость плотности монолита от весовой влажности (А) и порового отношения от влажностного отношения (Б) для четырех горизонтов Nudintric Vertic Stagnic Protosalic Solonetz (Clayic, Columnic, Cutanic, Humic, Hypernatric): 1, 2 - солонцовый гор. ASN (глубина 2-6 и 12-16 см); 3 - темногумусовый солонцеватый квазиглееватый гор. AU_{b,sn,q} (28-32 см); 4 - вертикальный квазиглеевый карбонатный гор. V/Q_{1ca,nc} (70-74 см).

Статистическое кумулятивное распределение порового отношения на пределе усадки $e(\Theta=0)$ для солонцовых горизонтов смещено в сторону более высоких значений по сравнению с вертикальными горизонтами, хотя концевые участки распределений в области перцентилей от 0 до 10% и выше 95% близки (рис. 2 А). Мода $e(\Theta=0)$ солонцовых горизонтов (0.61) в 1.3 раза больше моды $e(\Theta=0)$ вертикальных горизонтов (0.47).

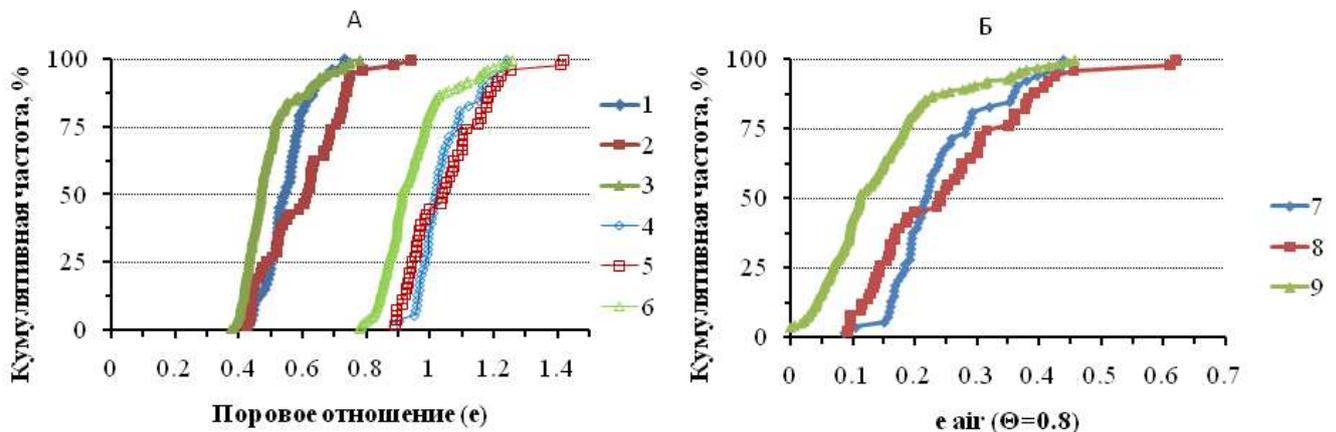


Рис. 2. Эмпирические статистические кумулятивные распределения порового отношения $e(\Theta=0)$ в высохшем состоянии (А, 1-3), $e(\Theta=0.8)$ во влажном состоянии (А, 4-6) и величины $e_{air}(0.8)$ (Б, 7-9) трех групп горизонтов почв: 1, 4, 7 - верхние горизонты без признаков элювиирования, солонцеватости и сликенсайдов; 2, 5, 8 - солонцовые и солонцеватые горизонты; 3, 6, 9 - средние и нижние горизонты со сликенсайдами.

Линейный участок нормальной усадки в вертикальных горизонтах проходит близко вдоль линии равных значений e и Θ (рис. 1 Б). Величина $e_{air}(0.8)$, характеризующая поры с воздухом, варьирует в 80% случаев от 0 до 0.20 с модой 0.11 и максимумом 0.45 (рис. 2 Б). В солонцовых горизонтах величина $e_{air}(0.8)$ изменяется преимущественно от 0.09 до 0.45 с модой 0.24 и максимумом 0.62.

Это свидетельствует о более высокой структурной организации солонцовых горизонтов по сравнению с вертикальными. Структурное состояние солонцовых горизонтов



поддерживается объемным каркасом сетки глинистых кутан на всех гранях структурных отдельностей, который и обеспечивает сохранение части порового пространства, не допуская его полного коллапса при усадке.

Вертикальные горизонты характеризуются наиболее низкими значениями свободного члена уравнений регрессии участка нормальной усадки и, наоборот, наиболее высокими значениями углового коэффициента этой регрессии (рис. 3 А). Для солонцовых горизонтов картина обратная: более высокие значения свободного члена и более низкие значения углового коэффициента. Следовательно, в солонцовых по сравнению с вертикальными горизонтами больше пор, объем которых изменяется непропорционально объему заполняющей их воды. Тогда как в вертикальных горизонтах чаще наблюдается более тесная пропорциональная зависимость изменения объема пор при изменении влажности почвы.

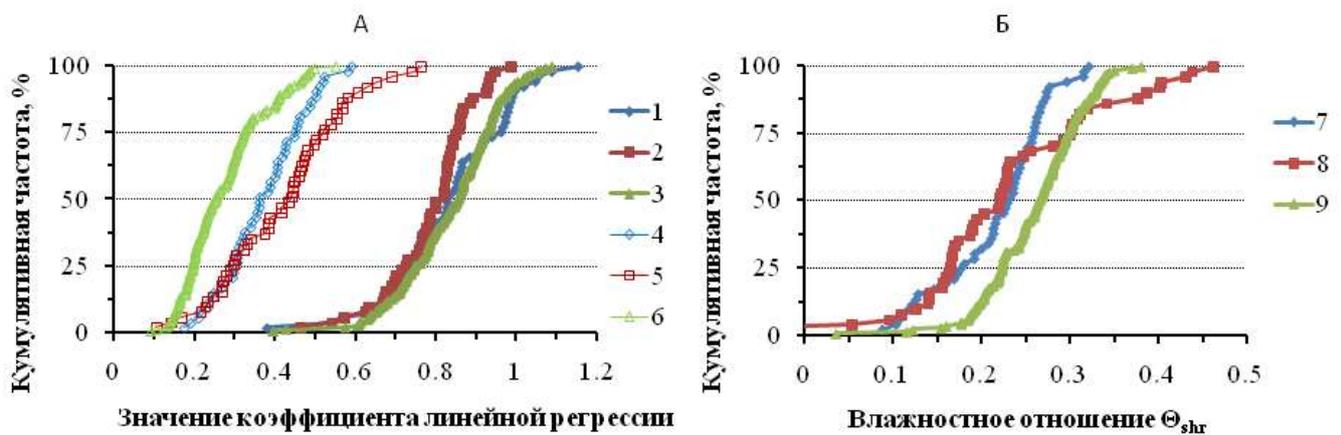


Рис. 3. Эмпирические статистические кумулятивные распределения коэффициентов "b" (А, 1-3) и "a" (А, 4-6) линейной регрессии $e = a + b \Theta$ участка нормальной усадки (А) и влажностного отношения Θ_{shr} предела усадки (Б) трех групп горизонтов почв: 1, 4, 7 - верхние горизонты без признаков элювиирования, солонцеватости и сликенсайдов; 2, 5, 8 - солонцовые и солонцеватые горизонты; 3, 6, 9 - средние и нижние горизонты со сликенсайдами.

С другой стороны, относительное смещение кумулятивных распределений коэффициента "b" для обеих групп горизонтов небольшое (0.06-0.09) по сравнению с общим близким диапазоном изменения (от 0.46 до 0.98 для солонцовых и от 0.57 до 1.07 для вертикальных) и одинаковым размахом (около 0.5). Можно заключить, что различия структурного состояния по характеру нормальной усадки монолитов для солонцовых и вертикальных небольшие и выражены лишь на уровне тенденции.

Известно несколько форм кривых усадки (Cornelis et al., 2006; Chertkov, 2015; Leong, Wijaya, 2015). Для Vertisols зависимость порового отношения (e) от влажностного отношения (Θ) обычно имеет вид ломаной кривой с двумя линейными участками: один в области сравнительно высокой влажности - нормальная усадка, второй - почти горизонтальный после предела усадки. Иногда на их стыке наблюдается слабо выраженный сглаженный переход (Chertkov, 2015; Leong, Wijaya, 2015). Кривые усадки вертикальных горизонтов исследованных глинистых почв Восточно-Европейской равнины имеют форму, характерную для Vertisols других регионов Мира.

Обычные суглинистые солонцы, не имеющие вертикальных горизонтов в профиле, слабо проявляют набухание и усадку, а их поверхностные солонцово-элювиальные гор. SEL практически не меняют свой объем во всем диапазоне влажности.



Верхние солонцовые и нижние вертикальные горизонты в Vertic Solonetz, проявляют похожие физические свойства, затрудняющие их использование, но отличаются по параметрам усадки и плотности. Причина - солонцовые горизонты имеют объемный каркас глинистых кутан, а вертикальные горизонты - упорядоченное расположение глинистых частиц под действием высоких боковых напряжений и локальных сдвигов.

Выводы

1. Вертикальные горизонты средней и нижней частей почвенного профиля Vertisols, Vertic Solonetz и других вертикальных почв имеют наиболее компактное состояние на пределе усадки и хорошо выраженный участок нормальной усадки.

2. Форма кривой усадки исследованных вертикальных горизонтов почв Восточно-Европейской равнины совпадает качественно с таковой глинистых набухающих почв (Vertisols) других регионов Мира.

3. Солонцовые глинистые горизонты, развитые в почвенных профилях Vertic Solonetz, имеют близкий диапазон изменения параметров усадки по сравнению с вертикальными горизонтами. Вместе с тем они отличаются более высокими значениями объема пор, мало меняющихся при испарении влаги, более низкой плотностью на пределе усадки, и более пологим линейным участком нормальной усадки. Структурное состояние солонцовых горизонтов поддерживается объемным каркасом сетки глинистых кутан на всех гранях структурных отдельностей, который и обеспечивает сохранение части порового пространства, не допуская его полного коллапса при усадке.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 17-04-00555).

Литература

- Грачев В.А., Корнблум Э.А. (1982) Кинетика набухания и набухаемость почв солонцовых комплексов и солодей Заволжья. Почвоведение. № 1. С. 55-66.
- Хитров Н.Б. (2003) Генезис, диагностика, свойства и функционирование глинистых набухающих почв Центрального Предкавказья. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 505 с.
- Ahmad N., Mermut A. (eds.) (1996) Vertisols and Technologies for Their Management. *Developments in Soil Science*, Vol. 24. Amsterdam: Elsevier. 549 p.
- Chertkov V.Y. (2015) Physical modeling of shrink–swell cycles and cracking in a clayey vadose zone. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 1, 16-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2015.02.001>
- Coulombe C.E., Wilding L.P., Dixon J.B. (1996) [Overview of Vertisols: Characteristics and Impacts on Society](#). *Advances in Agronomy*, Vol. 57, 289-375.
- Cornelis W.M., Corluy J., Medina H., Díaz J., Hartmann R., Van Meirvenne M., Ruiz M.E. (2006) Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve. *Geoderma*, 137, 179–191. doi:10.1016/j.geoderma.2006.08.022
- Kishné A.S., Morgan C.L.S., Ge Y., Miller W.L. (2010) Antecedent soil moisture affecting surface cracking of a Vertisol in field conditions. *Geoderma*. Vol. 157. 109-117. doi:10.1016/j.geoderma.2010.03.020
- Leong E.C., Wijaya M. (2015) Universal soil shrinkage curve equation. *Geoderma*. 237-238, 78-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.012>
- Somasundaram J., Lal R., Sinha N.K., Dalal R., Chitralkha A., Chaudhary R.S., Patra A.K. (2018) Chapter three. Cracks and Potholes in Vertisols: Characteristics, Occurrence, and Management. *Advances in Agronomy*, Vol. 149, 93-159. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.01.001>



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕРНОЗЕМОВ ВЫЩЕЛОЧЕННЫХ И ТЕМНО- СЕРЫХ ПОЧВ ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

Хованова Е.В. Степанцова Л.В. Красина Т.В. Красин В.Н.

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, РФ,
shchekochikhina7@mail.ru

INFLUENCE OF PHYSICAL-HYDROLOGICAL PROPERTIES OF LEASTED CHERNOZEMS OF DARK
GRAY SOILS OF THE LIPETSK REGION ON THE PRODUCTIVITY OF SUGAR BEET

Khovanova E.V. Stepantsova L.V. Krasina T.V. Krasin V.N.
FSBEI HE Michurinsk SAU, Michurinsk, RF

Annotation: the decrease in sugar beet productivity by 40-50% on the dark gray soils of the Lipetsk region and the lower resistance of its crops to droughts compared with leached chernozem is due to the deterioration of the physical and hydrological properties of the soil: a decrease in the range of active moisture, a lower water retention capacity

Введение

Сахарная свекла предъявляет высокие требования к почвенному плодородию (Карташова, 2006). Лучшими для нее являются черноземы, обладающие высокой влагоемкостью и воздухопроницаемостью. При современных технологиях возделывания ее урожайность в средние годы составляет 500-600 ц/га. В ЦЧЗ сахарная свекла является одной из наиболее возделываемых и экономически выгодных культур (Зейдельман, 2013; Полевщиков, 2002), ее в основном выращивают без орошения. Расширение посевов этой культуры повлекло за собой вовлечение в свекловичный севооборот серых-лесных почв легкого гранулометрического составе. Ряд работ последних лет показывают, что эти сельскохозяйственные культуры на этих почвах менее устойчивы к засухам (Зуйдельман, 2012; Зейдельман, 2018).

Объекты и методы

Цель настоящей работы: сравнить физико-гидрологические особенности и режим влажности в 2018 г под посевами сахарной свеклы на черноземах и темно-серых почвах Липецкой области и выявить причины снижения продуктивности сахарной свеклы на темно-серых почвах.

Исследования проводились на территории ООО «Усманский Агрокомплекс» Усманского района Липецкой области. Гранулометрический состав почвы определяли по Долгову и Личмановой, НВ и МГ – по Николаеву, ВЗ и ВРК- расчетом, режим влажности почвы – бурением скважин до глубины 1 м с отбором проб через 20 см 2 раза в месяц и определение влажности - термостатно-весовым методом.

Результаты

Различия физико-гидрологических свойств чернозема и темно-серой почвы обусловлены в первую очередь гранулометрическим составом. Тяжелый гранулометрический состав, равномерное распределение ила по профилю выщелоченного



чернозема и низкое содержание песчаной фракции (табл. 1) определяют хорошую оструктуренность почвы и широкий диапазон активной влаги (22-23%). Для темно-серых лесных почв характерны легкосуглинистый гранулометрический состав, элювиально-иллювиальное распределение ила и высокое содержание песчаной фракции в гумусовом горизонте. Это определяет бесструктурность верхних горизонтов и значительное сужение диапазона активной влаги (9-11 %). Именно ухудшение физико-гидрологических свойств (табл.3) определяет состояние растений в течении вегетационного периода и в итоге урожайность.

Таблица 1 Гранулометрический состав почв

| Глубина , см | Содержание фракции, размером, мм | | | | | | |
|------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|---------|--------|
| | > 0,25 | 0,25-0,05 | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 | 0,005-0,001 | < 0,001 | < 0,01 |
| Чернозем выщелоченный | | | | | | | |
| 0-20 | 6,0 | 18,0 | 28,2 | 10,0 | 19,0 | 18,8 | 47,8 |
| 20-40 | 5,0 | 16,8 | 28,8 | 9,8 | 18,8 | 20,8 | 49,4 |
| 40-60 | 4,7 | 17,3 | 25,4 | 12,0 | 16,4 | 24,2 | 52,6 |
| 60-80 | 4,8 | 19,1 | 25,4 | 8,2 | 16,2 | 26,4 | 50,8 |
| 80-100 | 4,3 | 21,1 | 30,6 | 9,4 | 15,0 | 19,6 | 44,0 |
| Темно-серая почва | | | | | | | |
| 0-20 | 34,0 | 36,4 | 10,6 | 4,4 | 8,8 | 5,8 | 19,0 |
| 20-40 | 40,3 | 38,1 | 6,8 | 3,2 | 6,4 | 5,2 | 14,8 |
| 40-60 | 37,2 | 35,2 | 8,6 | 3,2 | 5,4 | 10,4 | 19,0 |
| 60-80 | 27,3 | 31,7 | 11,4 | 5,6 | 6,6 | 17,4 | 29,6 |
| 80-100 | 40,0 | 34,8 | 6,6 | 1,8 | 5,0 | 11,8 | 18,6 |

Погодные условия в 2018 году были довольно неблагоприятными для роста и развития сахарной свеклы. Причиной этому послужили невысокие весенние запасы влаги в и несколько засух за вегетационный период (табл. 2): кратковременная – в первой декаде, июньская – продолжавшаяся более 2-х декад и августовская – самая продолжительная, сопровождавшаяся высокими среднесуточными температурами. Невысокое количество зимних осадков и засуха в начале мая определили то, что к началу вегетации и на выщелоченном черноземе, и на серой лесной почве влажность не превышает ВРК. Июньская засуха практически не отразилась на состоянии растений на выщелоченном черноземе. А на темно-серой лесной почве дефицит влаги проявляется уже к середине июня, растения прекращают свой рост и начинают отставать в развитии. Интересно отметить, что на выщелоченном черноземе при влажности гумусовых горизонтов около 1,2 ВЗ растения сахарной свеклы чувствуют себя нормально, а на серой лесной почве уже при влажности 0,8 ВРК видны признаки увядания. По-видимому, это связано с тем, что на однородных по гранулометрическому составу выщелоченных черноземах растения получают влагу из нижних горизонтов за счет капиллярного подтока. В профиле темно-серых почв легкий опесчаненый состав гумусовых горизонтов сменяется иловатыми плотными иллювиальными горизонтами, ниже в материнской породе состав становится более легким. Слоистость почвы существенно замедляет поступление влаги в верхние горизонты за счет капиллярного подтока.

Отставание в развитии растений сахарной свеклы на темно-серой почве не компенсируется выпавшими июльскими осадками. Влага, поступившая в почву с ливневыми



осадками в середине лета, равномерно распределяется в верхних гумусовых горизонтах выщелоченного чернозема, она активно используется растениями, что сопровождается ростом биомассы листьев и корнеплодов. В темно-серой лесной почве влага накапливается на плотных нижних горизонтах, верхние слои почвы при этом остаются сухими. Хотя состояние растений на этой почве и улучшается, но активного роста и развития растений не наблюдается.

Таблица 2. Погодные условия 2018 года

| Декады | Среднесуточная температура, °С | | | | | Осадки мм | | | | |
|--------|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|-----------|------|------|------|--------|
| | апр. | май | июнь | июль | Август | апр. | май | июнь | июль | август |
| I | +5,0 | +19,3 | +13,5 | +19,3 | +21,3 | 11,2 | 0 | 0,6 | 12,3 | 0,4 |
| II | +7,9 | +15,9 | +18,3 | +21,9 | +20,8 | 13,9 | 15,1 | 2,7 | 23,6 | 0,3 |
| III | +10,2 | +16,6 | +21,8 | +21,4 | +19,8 | 22,1 | 21,9 | 8,0 | 10,5 | 1,0 |

Таблица 3. Гидрологические константы и влажности почвы (% от веса) в 2018 году

| Глубина, см | Гидрологические константы | | | | Влажность почвы, | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|------|------|------|------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--|
| | МГ | ВЗ | ВРК | НВ | 11.05 | 25.05 | 15.06 | 3.07 | 26.07 | 07.08 | 20.08 | |
| Чернозем выщелоченный | | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | 7,4 | 11,1 | 23,7 | 33,9 | 21,5 | 24,3 | 17,4 | 23,5 | 21,2 | 11,2 | 13,1 | |
| 20-40 | 8,5 | 12,8 | 24,3 | 34,7 | 23,4 | 24,6 | 19,0 | 14,9 | 15,3 | 15,8 | 11,3 | |
| 40-60 | 8,5 | 12,5 | 22,5 | 32,2 | 23,7 | 22,7 | 23,1 | 17,2 | 15,4 | 15,4 | 14,6 | |
| 60-70 | 7,6 | 11,4 | 21,7 | 31,0 | 22,3 | 22,3 | 22,4 | 19,6 | 16,7 | 15,0 | 12,0 | |
| 80-100 | 7,7 | 11,5 | 25,2 | 36,0 | 24,8 | 21,9 | 21,4 | 19,9 | 20,7 | 14,9 | 11,2 | |
| Темно-серая лесная почва | | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | 2,6 | 4,0 | 9,7 | 13,8 | 10,9 | 11,1 | 11,7 | 13,7 | 17,2 | 6,1 | 5,0 | |
| 20-40 | 2,0 | 3,0 | 9,8 | 14,0 | 9,4 | 12,7 | 9,9 | 10,5 | 8,5 | 6,6 | 5,3 | |
| 40-60 | 2,4 | 3,6 | 8,1 | 11,6 | 10,2 | 11,9 | 9,6 | 11,1 | 10,3 | 7,0 | 5,0 | |
| 60-80 | 2,8 | 4,2 | 12,9 | 18,4 | 11,3 | 12,3 | 10,9 | 13,0 | 15,4 | 6,9 | 6,5 | |
| 80-100 | 2,7 | 4,01 | 10,4 | 14,9 | 10,9 | 13,0 | 10,2 | 13,7 | 9,8 | 6,5 | 6,0 | |

Таблица 4. Состояние сахарной свеклы по датам наблюдения и урожайность в 2018г

| Дата наблюдений | Чернозем выщелоченный | | Темно-серая лесная почва | |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | Состояние сахарной свекла | Урожайность в 2018 г, ц/га | Состояние сахарной свекла | Урожайность в 2018 г, ц/га |
| 11.05 | Отличное | | Отличное | |
| 25.05 | Отличное | | Отличное | |
| 15.06 | Отличное | | Слабое угнетение | |
| 3.07 | Хорошее | 358 ± 25 | Очень слабое угнетение | 195 ± 13 |
| 26.07 | Хорошее | | Среднее угнетение | |
| 7.08 | Слабое угнетение | | Сильное угнетение | |
| 20.08 | Сильное угнетение | | Усыхание свеклы | |

Засуха, начавшаяся в начале августа, сопровождалась высокими до 30°С дневными температурами. На темно-серой лесной почве влажность уже в первой декаде августа опустилась до значений близких к ВЗ, растения полностью прекратили свой рост,



наблюдается усыхание листьев и корнеплодов, при этом влажность почвы не опускается до значений ВЗ. На выщелоченном черноземе в первой половине августа потеря тургора листьями сахарной свеклы наблюдалась в наиболее жаркие летние часы, во второй половине дня растения выглядят нормально. Только к началу сентября влажность в метровом слое выщелоченного чернозема опускается до значений ВЗ, растения прекращают свой рост, отмечается повсеместное угнетение растений.

К началу сентября практически по всей Тамбовской и Липецкой области влажность почвы под посевами сахарной свеклы опустилась до ВЗ и наблюдается повсеместное засыхание посевов. Несмотря на это урожайность на почвах черноземного ряда была существенно выше, чем на темно-серых почвах.

Выводы.

1. Темно-серые лесные почвы Липецкой области отличаются от выщелоченных черноземов более узким диапазоном влаги, меньшими значениями гидрологических констант и меньшей водоудерживающей способностью.

2. На выщелоченном черноземе даже при влажности верхних горизонтов 1,2 ВЗ растения сахарной свеклы не испытывают дефицита влаги, за счет ее поступления из нижних горизонтов, на темно-серой лесной почве при влажности уже при влажности 0,7-0,8 ВРК видны признаки угнетения растений

3. Осадки вегетационного периода на выщелоченном черноземе равномерно распределяются по гумусовому горизонту и активно используются растениями, на темно-серых лесных почвах накапливаются на плотных иллювиальных горизонтах, оставляя сухими –верхние.

4. Растения сахарной свеклы на темно-серых лесных почвах менее устойчивы к засухам, чем на выщелоченных черноземах. В засушливые годы разница в продуктивности составляет более чем в 50%.

5. В условиях ЦЧЗ легкосуглинистые и супесчаные серые лесные почвы лучше исключить из свекловичных севооборотов.

Благодарность

Исследования проводились на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ.

Литература

- Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Волохина В.П. Темно-серые почвы на двучленных отложениях севера Тамбовской равнины: агроэкология, свойства и диагностика // Почвоведение, 2012. № 5. С. 515-529.
- Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С., Степанцова Л.В., Красин В.Н., Даутоков И.М., Красина Т.В. Светло-серые поверхностно-оглеенные супесчаные почвы севера Тамбовской равнины: агроэкология, свойства и диагностика// Почвоведение, 2018. № 4. С. 413-426.
- Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б.; Красина Т.В. Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения, способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013 – 352с.
- Полевщиков С.И. Влияние возделывания сахарной свеклы на плодородие выщелоченных черноземов Тамбовской области. Мичуринск, изд-во МичГАУ, 2002. 113с.
- Технология возделывания сахарной свеклы в условиях Тамбовской области (рекомендации производству, под ред. Карташова В.П., Полевщикова С.И. и др.), Тамбов, 2006. 24с



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ГЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА И ВЫНОС ИЗ НИХ КРЕМНИЯ, КАЛЬЦИЯ И ЖЕЛЕЗА С ЛИЗИМЕТРИЧЕСКИМИ ВОДАМИ (МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

Черкас С.М.¹, Зайдельман Ф.Р.², Дзизенко Н.Н.³

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
svetlana.cherkas8@gmail.com

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
frz10@yandex.ru

³Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
dnn.eco.88@gmail.com

THE INFLUENCE OF GLEYZATION ON THE PROPERTIES OF THE PARENT ROCKS AND THE CHEMICAL COMPOSITION (SI, CA, FE) OF THE LYSIMETRIC WATER: A MODEL EXPERIMENT

Cherkas S.M., Zaidelman F.R., Dzizenko N.N.

Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: The influence of gleyzation and sulfate reduction on lysimetric waters collected from different heavy-textured soil-forming rocks (river alluvium, loess-like clays, and lacustrine-alluvial deposits) is considered. Under the stagnant-percolative water regime, the gleyzation caused the acidification of the waters (by 1.5–2.5 pH units); the intense removal of iron, calcium, and silica; a drastic decrease of the base saturation; and an increase in the hydrolytic (total) acidity. The content of mobile aluminum in the soils, as compared to the parent rock, increased by tens of times; under a stagnant water regime, the changes in the physicochemical soil properties were less significant or absent. The maximum removal of iron was found from the river alluvium followed by that from the loess-like clay and saline lacustrine alluvium. Unlike the other elements, the greater removal of silica was observed not at the beginning of the experiment (as in the case with iron and calcium) but at its end.

Введение

Глееобразование – один из наиболее распространенных почвообразовательных процессов на Земле. Однако этим не исчерпывается его значение для теории и практики почвоведения, мелиорации и земледелия. Оно определяется еще и тем, что глееобразование ответственно за возникновение ряда других процессов почвообразования. Например, подзолообразования [11], формирования солодей [14, 17], черноземовидных подзолистых почв, подбелов и ряда других [7].

Широкое распространение глееобразования обусловлено тем, что для его возникновения практически в любой природной зоне необходимы и достаточны три простых и почти повсеместно встречающихся условия: 1) переувлажнение; 2) наличие анаэробной гетеротрофной микрофлоры; 3) присутствие органического вещества, способного к ферментации.

Внимание к глееобразованию можно проследить на всем протяжении становления развития почвоведения как науки. Впервые термин “глей” введен в научную литературу Докучаевым [4]. Он использовал этот народный термин в своей магистерской диссертации “Способы образования речных долин Европейской России”, опубликованной в 1878 г. Позднее в 1905 г. Высоцкий в статье “Глей” в журнале “Почвоведение” сформулировал диагностические признаки процесса [3]. В дальнейшем изучению глеевых почв были посвящены работы Завалишина [6], Веригиной [1, 2] и др. Существенный вклад в изучение проблемы внесли Блумфильд [27, 28], Ярков [26], Евсева [5], Кауричев [19–23], Зайдельман



[8, 9], Касаткин [18], Сюта [25], в значительной мере разработавшие методы экспериментального моделирования процесса глееобразования.

Этот процесс реализуется в анаэробных условиях на кислых, нейтральных и выщелоченных породах при отсутствии в них сульфатов. Ранее показано [10, 12, 15], что глееобразование может проявляться в двух различных формах гидрологического режима: застойном и застойно-промывном [13]. В результате такого различия водного режима почв под влиянием глееобразования формируются две принципиально различных группы почв. Во-первых, недифференцированные интенсивно оглеенные почвы, например, дерново-глеевые, торфяно-глеевые, торфянисто-глеевые и др. Во-вторых, в условиях застойно-промывного водного режима возникают четко выраженные дифференцированные в разной степени оглеения подзолистые, дерново-подзолистые почвы, солоды, черноземовидные подзолистые и многие другие почвы [7, 14]. Почвы, образованные в условиях застойно-промывного режима, независимо от зональной приуроченности, отличаются присутствием мощного подзолистого горизонта (10–25 см и более), наличием Fe–Mn конкреций, гумусовых или глинистых кутан. Все эти признаки, как правило, отсутствуют в почвах с застойным водным режимом.

Объекты исследований

Модельный эксперимент выполняли с использованием трёх контрастных по своим свойствам и генезису тяжелых почвообразующих пород. Эксперименты по моделированию глееобразования в лабораторных условиях на отобранных для исследования почвообразующих породах ранее не проводились. Были выбраны следующие породы: речной легкоглинистый аллювий поймы р. Москвы; лёссовидная легкая глина Владимирского Ополья; озёрный засоленный тяжелосуглинистый карбонатный аллювий Барабинской низменности.

Методика постановки модельного эксперимента

До начала эксперимента из образца породы (более 10 кг) были отобраны множественные пробы массой по 1,7 кг. Для каждого варианта почвообразующей породы были приготовлены три образца (контроль и оглеение в условиях застойно-промывного водного режима, оглеение в условиях застойного режима) и помещены в пластмассовые прямоугольные сосуды (13,5x13,5x30 см) на основание из отмытого соляной кислотой кварцевого песка мощностью около 4 см. Исследуемые образцы заливали дистиллированной водой (контроль) или 1% раствором сахарозы (оглеение на фоне застойно-промывного и застойного водных режимов). Раствор 1% сахарозы предназначен для активизации анаэробной микрофлоры.

В вариантах опыта с застойно-промывным водным режимом использовали сосуды с дренажем на дне для регулярного сброса лизиметрических вод. Сброс и химический анализ лизиметрических вод в вариантах с застойно-промывным режимом производили один раз в декаду. Затем образцы на 3 – 4 суток оставляли на высушивание и вновь заливали 1% раствором сахарозы. При этом непосредственно до сброса лизиметрических вод и перед повторным заливом производили замер окислительно-восстановительного потенциала твердой фазы образца в его поверхностном слое.

Варианты опыта с застойным режимом были размещены в сосудах с постоянно закрытыми зажимами. В этом варианте сахарозу в начале опыта вносили с первым затоплением, а также при увеличении окислительно-восстановительного потенциала, вследствие использования сахарозы анаэробной микрофлорой.



В общей сложности было выполнено 60 циклов обводнения пород, сброса лизиметрических вод и аэрации образцов. Продолжительность модельного эксперимента составила 3 года.

Эксперимент по моделированию глееобразования проводили в два этапа. На первом этапе выполняли работу по изучению влияния глееобразования на вынос кальция, кремния и железа из почвообразующих пород с лизиметрическими водами, измерялись рН лизиметрических вод и Eh почвообразующих пород. На втором этапе эксперимента, после завершения инкубации в условиях застойно-промывного и застойного водного режима, образцы почвообразующих пород были извлечены из пластмассовых сосудов и высушены. В дальнейшем в них послойно были исследованы изменения основных физико-химических характеристик почвообразующих пород (рН_{H2O} и рН_{KCl}, гидролитической кислотности, определение обменных кальция, магния, натрия и калия), валового химического и гранулометрического составов пород в результате длительного влияния гидроморфизма.

Результаты исследований

1. В условиях модельного эксперимента отчетливые морфохроматические признаки оглеения проявляются уже через 4 – 6 недель после первого обводнения пород с внесением 1% раствора сахарозы, как в условиях застойно-промывного, так и застойного водных режимов. Через 4 – 6 месяцев эти признаки проявляются во всей исследуемой толще почвообразующей породы. Таким образом, развитие глееобразования на исследуемых породах можно качественно обнаружить по изменению их морфологии после непродолжительного развития этих процессов в толще породы.

2. Окислительно-восстановительный режим трёх исследованных почвообразующих пород характеризуется четко выраженным индивидуальным рисунком на протяжении всего эксперимента.

3. Глееобразование оказывает существенное влияние на физико-химические и химические свойства лизиметрических вод, поступающих из тяжёлых почвообразующих пород разного генезиса: речного глинистого аллювия, лёссовидной легкой глины, озерного засоленного тяжелосуглинистого карбонатного аллювия. Наиболее контрастно это влияние проявляется в условиях застойно-промывного водного режима.

4. Оглеение в условиях застойно-промывного водного режима вызывает подкисление вод на 1.5–2.5 единицы рН, а также вынос с лизиметрическими водами железа, кальция, кремния, резкое уменьшение степени насыщенности основаниями, увеличение гидролитической кислотности в бескарбонатных нейтральных и кислых породах.

5. В результате подкисления вод и пород в процессе глееобразования происходит резкое увеличение (в 50–500 раз) содержания подвижного алюминия (по Соколову) в эксперименте с нейтральными и слабокислыми породами в условиях застойно-промывного водного режима. В карбонатных породах увеличение содержания подвижного алюминия наблюдалось в слоях 0–3 и 3–30 мм – в 29 и 4 раз соответственно по отношению к исходной породе.

6. Глееобразование в условиях застойного режима не вызывает существенного изменения исходных физико-химических свойств почвообразующих пород.

7. В отличие от других элементов, установлено значительное увеличение выноса кремния с лизиметрическими водами на заключительном этапе эксперимента из всех почвообразующих пород в условиях застойно-промывного водного режима. Вероятно, резкое увеличение концентрации кремния в конце эксперимента может быть связано с разрушением



алюмосиликатов в условиях длительного глееобразования при застойно-промывном водном режиме.

8. Химический состав лизиметрических вод существенно меняется в зависимости от генетических особенностей пород и их состава, а также особенностей водного режима, в котором реализуется глееобразование. Это обстоятельство необходимо учитывать при прогнозе химического состава почвенных вод.

9. Глееобразование в условиях застойно-промывного водного режима вызывает существенную трансформацию валового химического состава почвообразующих пород. Во всех породах установлена заметная относительная аккумуляция SiO_2 в элементном составе на фоне уменьшения процентного содержания MnO , SO_3 , CaO и MgO . В незасоленных бескарбонатных породах установлено резкое снижение количества Fe_2O_3 в валовом составе. В озерном засоленном тяжелосуглинистом карбонатном аллювии относительное содержание Fe_2O_3 в валовом составе в целом осталось на уровне исходной породы, вероятно, в результате торможения его выноса запасами карбонатов и сульфатов. Существенных систематических изменений валового содержания TiO_2 и Al_2O_3 в породах обнаружено не было.

10. В незасоленных бескарбонатных породах установлена выраженная элювиально-иллювиальная дифференциация толщи образцов по содержанию SiO_2 , Fe_2O_3 и MnO . При этом в озерном засоленном тяжелосуглинистом карбонатном аллювии элювиально-иллювиальное распределение обнаружено для SiO_2 , CaO , MgO , SO_3 и MnO .

11. Результаты исследований подтвердили целесообразность дифференциации процесса глееобразования на две различных формы, определяемые особенностями водного режима: застойного и застойно-промывного. В первом случае формируются почвы с недифференцированным профилем; во втором (на кислых, нейтральных и выщелоченных породах) – с дифференцированным профилем и светлыми кислыми элювиальными горизонтами.

Литература

1. Веригина К.В., Завалишин А.А., Максимюк Г.П. Итоги работ по изучению процессов заболачивания // Проблемы советского почвоведения. Сб. XI. М., 1940.
2. Веригина К.В. К характеристике процессов оглеения почв // Тр. института почвоведения АН СССР. М., 1953. Т. 4.
3. Высоцкий Г.Н. Глей // Почвоведение. 1905. № 4. С. 291–327.
4. Докучаев В.В. Способы образования речных долин Европейской России. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 1. С. 113–255.
5. Евсева Р.П. Водорастворимые соединения аммония в подзолистых и дерново-подзолистых почвах. Автореф. дис. ... канд. с.-х. н. М., 1968. 17 с.
6. Завалишин А.А. Несколько наблюдений к познанию почв с близким глеевым горизонтом // Сб. памяти акад. К.Д. Глинки. М.: Изд-во АН СССР, 1928.
7. Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: Изд-во КДУ, 2009. 720 с.
8. Зайдельман Ф.Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 327 с.
9. Зайдельман Ф.Р. Естественное и антропогенное переувлажнение почв. Деградация, использование и охрана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 228 с.
10. Зайдельман Ф.Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. М.: Колос, 1975. 317 с.
11. Зайдельман Ф.Р. Подзоло- и глееобразование. М.: Наука, 1974. 204 с.



12. Зайдельман Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 300 с.
13. Зайдельман Ф.Р. Закономерности формирования светлых кислых элювиальных горизонтов в профиле почв. Диплом № 3711. Научные открытия за 1995–1996 гг. Приоритет от 28 июля 1974 г. Изд-ва РАЕН и ААНО, 1997. С. 14.
14. Зайдельман Ф.Р. Теория образования светлых кислых элювиальных горизонтов и ее прикладные аспекты. М.: Краснодар, 2010. 248 с.
15. Зайдельман Ф.Р., Нарокова Р.П. Глееобразование при застойном и промывном режимах в условиях лабораторного моделирования // Почвоведение. 1978. № 3. С. 42–53.
16. Зайдельман Ф.Р., Устинов М.Т., Пахомова Е.Ю. Солоди Барабинской низменности с Приобского плато: свойства, генезис, методы диагностики // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1155–1170.
17. Зайдельман Ф.Р., Дзизенко Н.Н., Черкас С.М. Влияние глееобразования и сульфатредукции на разных породах на свойства лизиметрических вод (модельный эксперимент) // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1073–1083.
18. Касаткин В.Г. Подвижность железа, кальция и реакция среды при анаэробных процессах в условиях лабораторного опыта // Науч. тр. Ивановского СХИ. 1947. Вып. 6. С. 9–13.
19. Кауричев И.С. Почвоведение. М.: Колос, 1982. 496 с.
20. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.М., Евсеева Р.П. Водорастворимый аммоний в почвах таежной зоны // Изв. сельскохозяйственной академии. 1968. № 6. С. 145–151.
21. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.М. Общие черты генезиса почв временно избыточного увлажнения // Новое в теории оподзоливания и осолодения почв. М.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 46–61.
22. Кауричев И.С., Базилинская М.В., Заболотнова Л.А. Влияние водорастворимых органических веществ на подвижность железа // Изв. ТСХА. 1979. № 1. С. 83–92.
23. Кауричев И.С., Орлов Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М.: Колос, 1982. 247 с.
24. Роде А.А. Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука СО, 1971.
25. Сюта Я. Влияние восстановительных процессов и подкисления на растворимость минеральных соединений почв // Почвоведение. 1962. № 2. С. 62–72.
26. Ярков С.П. Почвы лесолуговой зоны. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 318 с.
27. Bloomfield C. Experiments on the mechanism of gley formation // J. Soil Sci. 1951. V. 2. № 2. P. 196–211.
28. Bloomfield C. A study of podzolization. Part III. The mobilization of iron and aluminum by Scots pine needles // J. Soils Sci. 1954. V. 5. № 1.
29. Lutwick L.E., DeLong W.A. Leachates from decomposing leaves. II. Interaction with soil-forming materials // Canad. J. Agricult. Sci. 1954. V. 34. № 2. P. 203–213.
30. Wityn I.I. Der Bildungsprozess der Gleyboden // IX Agronomenkongress in Latwija. Riga, 1934.
31. Zaidelman F.R. A concept of gleyzation and its role in pedogenesis // Archives of Agronomy and Soil Science. 1994. V. 38. № 5. P. 323–336.



СЕКЦИЯ 5. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И ЭВОЛЮЦИЯ ПОЧВ



DETERMINING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL QUALITY INDEX IN A WATERSHED

Güler Sümeyye¹, Turgut Bülent², Hangişi Aktan³

¹Soil and ecology department of ArtvinÇoruh University, Artvin, Türkiye
sumeyyeguler322@gmail.com

²Soil and ecology department of ArtvinÇoruh University, Artvin, Türkiye
bturgut@artvin.edu.tr

³Soil and ecology department of ArtvinÇoruh University, Artvin, Türkiye

Introduction

A watershed is a topographically delineated area drained by a stream system; that is, the total land area above some point on a stream or river that drains past that point. A watershed is a hydrologic unit often used as a physical-biological unit and a socioeconomic-political unit for the planning and management of watershed resources (Brooks et al., 2012). The Godrahav watershed, designated as the study area, has a lot of land use types such as forest, agriculture, and grassland and topographic structures. Human pressure is also relatively low in this area. This diversity of the watershed has also led to variability in soil properties, so the area is suitable for spatial variability studies.

Soil quality is the capacity of a soil to function and promote plant and animal productivity, maintain or enhance water and air quality, and support human health and habitation. (Karlen et al., 1997). Soil quality involves the ability of the soil to maintain appropriate productivity, while simultaneously reducing the effect on the environment and contributing to human health (Schjonning et al., 2003). Due to the heterogeneity of soil properties even at a small scale, classical statistical methods are not suitable for analyzing the spatial distribution of soil (Turgut and Öztaş, 2012). Instead, geostatistical analyses are used to determine the spatial variability of soil properties.

The objectives of this study are to determine some physical and chemical properties of the watershed, to determine spatial variation in these properties, to develop distribution pattern maps of these properties, to determine the soil quality index of the watershed, to determine spatial variation in SQI, and to develop distribution pattern map of SQI.

Objects and methods

Objects

The study was conducted in the Godrahav watershed, located in Artvin province (Figure 1). The south corner coordinate of study area is 37T 773773D-4562944K and 738773D-4562944K, and the north corner coordinate is 741273D-4573944K and 743773D-4573944K. The watershed is predominantly covered with forest, as well as settlements and farmland are other land uses in the watershed. The mean annual rainfall and temperature are 700mm and 12.4 °C, respectively.

The watershed (approximately 50ha) was divided into 500x500m grids, generating 138 sampling points considering the availability of points (Figure 1). The disturbed and undisturbed soil samples (totally 276) were collected from surface layer in order to determine soil properties in summer 2018.



Fig.1. Study site location and sampling design

Methods

The disturbed soil samples were air dried, and sieved with 2mm sieving. Particle size distribution was determined by the hydrometer method (Gee et al., 1986). The aggregation rate (AR9) and the amount of soil aggregates resistant to water (AS) were determined using the Yoder wet-sieving method (Dane et al., 2002). Mean weight diameter (MWD) was calculated following equation (Van Bavel, 1950).

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

where y_i is the proportion of each size class by weight with respect to the total sample and x_i is the mean diameter of the size classes (mm). The amount of water that the soil samples can keep under pressure of -33 kPa (FK) and -1500 kPa (WP) was determined by applying pressure to 33 and 1500 kPa in the pressure membranes (Demiralay, 1993). The bulk density (BD) was determined by metal cylinders (100cm³) (Smith & Mullins, 2000). Total porosity (e) was calculated following equation (Smith & Mullins, 2000).

$$e = \left(1 - \frac{p_b}{p_p} \right)$$

where p_b is the dry bulk density of the sample, p_p is the particle density of the soil. Soil organic matter (OM) content was determined by the Walkley Black method (Schnitzer, 1991). The pH and EC values of the soil were measured in the 1:2.5 soil-water suspension (Conklin, 2005).

The soil quality index (SQI) was used for the comprehensive comparison among the effect of afforestation on soil properties. To calculate SQI; selection of indicators, weighting indicators, and scoring indicators steps were followed (Karlen, 1997). The weighting of each parameter was calculated by dividing the ratio of communality value obtained by the Principle Component Analysis by the total commonalities value (Johnson and Wichern, 1992).

The indicators were scored with the linear score functions, such as “more is better” “optimal range” and “less is better” (Zheng et al., 2005; Qi et al., 2009; Guo et al., 2017) for SQI. More is better functions was used for MWD, AS, AR, TC, TN, and TS, while less is better function was used for EC. Optimal range function was used for CC, SC, SaC, and pH. The functions are listed in Table 1, where x is the measured value of the indicator; x_1 and x_2 are the minimum and maximum values of



the indicator, respectively; r_1 and r_2 are the lower and the upper values of the optimal range, respectively.

Table 1 Indicators and function types

| Indicator | Function type | x_1 | r_1 | r_2 | x_2 | Equation | |
|-----------|----------------|-------|-------|-------|-------|---|---|
| AS | | 57.59 | | | 98.91 | | |
| AR | | 18.75 | | | 96.75 | | |
| MWD | More is better | 0.28 | | | 1.16 | $f(x) = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}$ | |
| e | | 1.33 | | | 87.38 | | |
| FC | | 15.26 | | | 91.62 | | |
| WP | | 8.48 | | | 75.97 | | |
| OM | | 0.15 | | | 5.90 | | |
| CC | Optimal range | 0.78 | 30 | 35 | 82.59 | $f(x) = \frac{(x - x_1)}{(r_1 - x_1)}; x_1 < x < x_2$ | |
| SaC | | 0.78 | 30 | 35 | 82.59 | | |
| SC | | 0.78 | 30 | 35 | 82.59 | | $f(x) = 1; r_1 < x < r_2$ |
| pH | | 1 | 6.8 | 7.2 | 14 | | $f(x) = \frac{(x - r_2)}{(x_2 - r_2)}; r_2 < x < x_2$ |
| EC | Less is better | 0.03 | | | 689 | $f(x) = 1 - \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}$ | |
| BD | | 0.19 | | | 1.47 | | |

Soil quality index was calculated using the following equations for SQI_{AHP} and SQI_{PCA}

$$SQI = \sum_{i=1}^n (a_i x b_i)$$

a_i is the weight of the i^{th} parameter and b_i is the score of the i^{th} parameter.

Mean, standard deviation, minimum, maximum, and coefficient of variation (CV) were determined for all properties measured. Geostatistical analysis was used to determine the spatial variability of soil properties (Oliver and Webster, 2014).

The land use, slope, elevation, and cover percentage of study area was created with ArcGIS software (Figure 2a, b, c, and d).

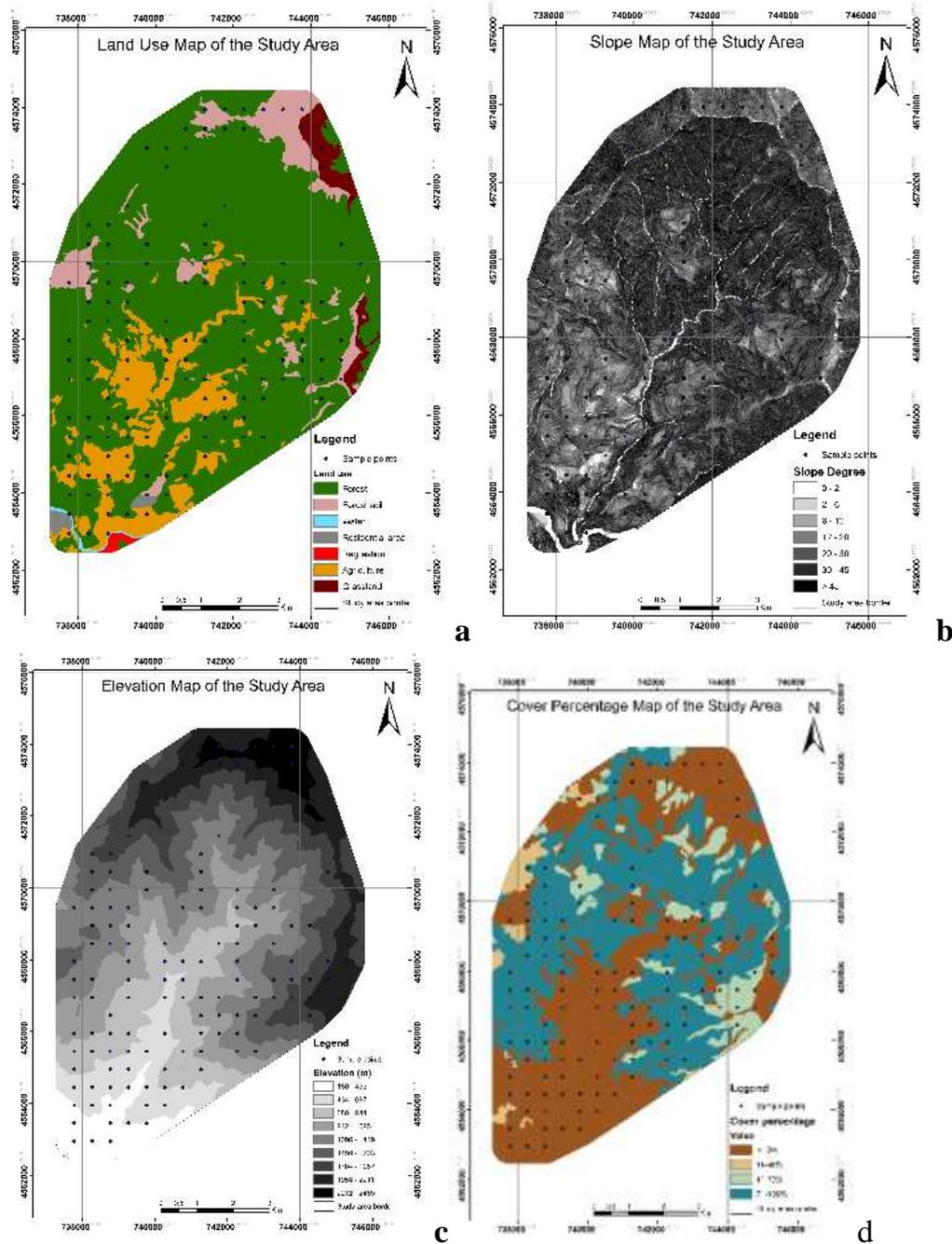


Fig.2. The basic descriptive features of the study area

Results and discussion

There were determined that the clay contents (CC) of the samples were between 3.79% and 59.56% and had an average of 29.16%, the sand content (SaC) of the soils had a mean of 48.81% and ranged between 9.12% and 82.59%, the silt content (SC) were between 0.78% and 44.02% and had a 22.03% ratio (Table 2). The texture class of study area is clayey sandy loam. Analysis of structural parameters showed that the MWD ranged from 0.28mm to 0.76mm and averaged 1.16mm. The AR ranged from 18.75% to 96.75% with an average of 69.81%. The AS changed between 57.59% and 98.91% and had an average of 86.10% (Table 1). It was determined that the BD ranged from 0.19 to 1.47g cm⁻³, and had an average of 0.91g cm⁻³. The *e* had a mean of 55.93% and changed between 1.33% and 87.38%. The FC and WP ranged from 15.26% to 91.62% and from 8.48% to 75.97%, respectively. The average of FC was 41.10% and WP was 30.32%. The OM changed



between 0.15% and 5.90% with an average of 3.43%. It was determined that pH and EC ranged from 3.71 to 7.66 and from $0.03\mu\text{s}/\text{cm}$ to $689\mu\text{s}/\text{cm}$, respectively. The average of pH was 5.76 and EC was $128.19\mu\text{s}\text{ cm}^{-1}$. It was also seen that the most variable property in the field was EC (CV: 95.33%) and the least variable feature was aggregate stability (CV: 10.39%).

Table 1. Descriptive statistics of soil properties

| Soil properties | Minimum | Maximum | Mean | Standard deviation | Coefficient of variation |
|--------------------------------|---------|---------|--------|--------------------|--------------------------|
| CC (%) | 3.79 | 59.56 | 29.16 | 10.77 | 36.93 |
| SaC (%) | 9.12 | 82.59 | 48.81 | 13.80 | 28.27 |
| SC (%) | 0.78 | 44.02 | 22.03 | 10.37 | 47.07 |
| AS (%) | 57.59 | 98.91 | 86.10 | 8.95 | 10.39 |
| AR (%) | 18.75 | 96.75 | 69.81 | 18.78 | 26.90 |
| MWD (mm) | 0.28 | 1.16 | 0.76 | 0.14 | 18.42 |
| BD (g cm^{-3}) | 0.19 | 1.47 | 0.91 | 0.29 | 31.87 |
| e (%) | 1.33 | 87.38 | 55.93 | 14.05 | 25.12 |
| FC (%) | 15.26 | 91.62 | 41.10 | 41.47 | 36.92 |
| WP (%) | 8.48 | 75.97 | 30.32 | 12.66 | 41.76 |
| OM (%) | 0.15 | 5.90 | 3.43 | 1.61 | 46.94 |
| pH | 3.71 | 7.66 | 5.76 | 1.00 | 17.36 |
| EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | 0.03 | 689 | 128.19 | 122.20 | 95.33 |

A principal component analysis (PCA) after a VARIMAX rotation generated one principal component (PC) with eigenvalues >1.00 . Therefore, it was calculated the weight of each parameter by communality value of each parameters following equation. The weights of each parameter are shown in Table 3. The highest weight obtained from the SaC and the lowest from BD (Figure 3).

$$w = \frac{\text{Communality value of parameter}}{\text{Total communality value}}$$

Table 3. The weights of parameters

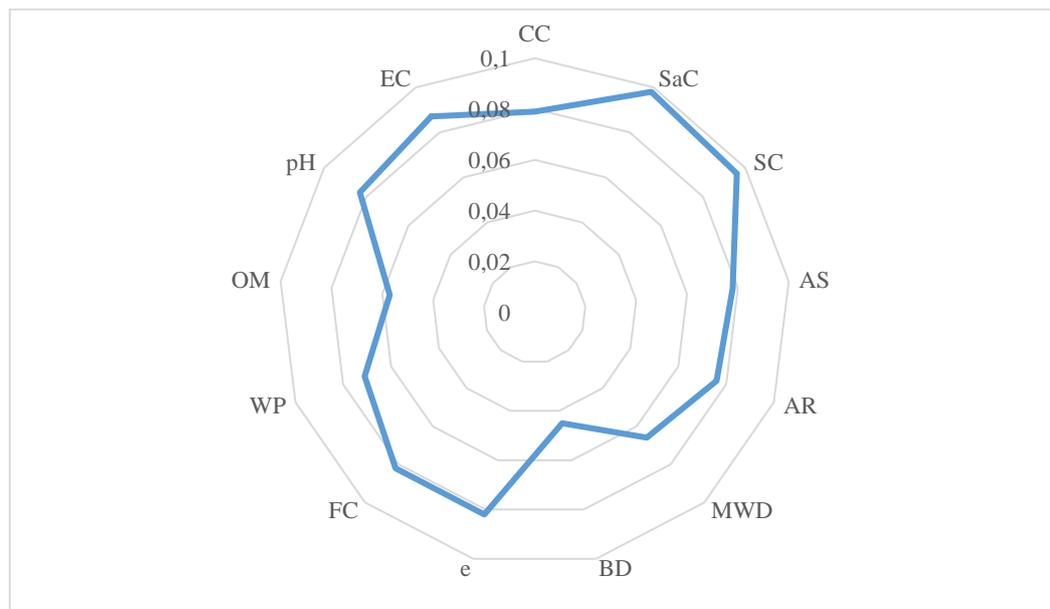


Fig.2. The weights of parameters

The “optimum value” function was used for the CC, SC, and SaC, where the value of 1 was given for the range of 30-35% and for pH, where the value of 1 was given for the range of 6.8-7.2.



The score increased to the optimum range and decreased after this point. The “more is better” function was applied to AS, AR, MWD, e, FC, WP, and OM, the “less is better” function was applied to BD and EC (Figure 3).

Geostatistical analysis result showed that SQI changed depending on distance (isotropic). An exponential model was the best at describing the spatial dependence of SQI and showed a strong spatial dependence. Block kriging was used to estimate values for soil properties in unsampled points. The contour map showed that SQI ranged between 0.43 and 0.72 (Figure 4). It is determined that SQI values vary according to land use, cover percentage, and elevation. In terms of land use, it was determined that SQI in grassland was the highest and forest, forest soil and agriculture land followed. The SQI also had the highest values in areas where the rate of cover percentage is 71-100% and 2212-2465m elevation but decreased due to the decrease in cover percentage and elevation. The main factor in the change of SQI is vegetation. In the pastures, the vegetation completely encloses the soil and gives a significant amount of organic matter, while soil tillage and the high mineralization degraded the soil in agricultural land.

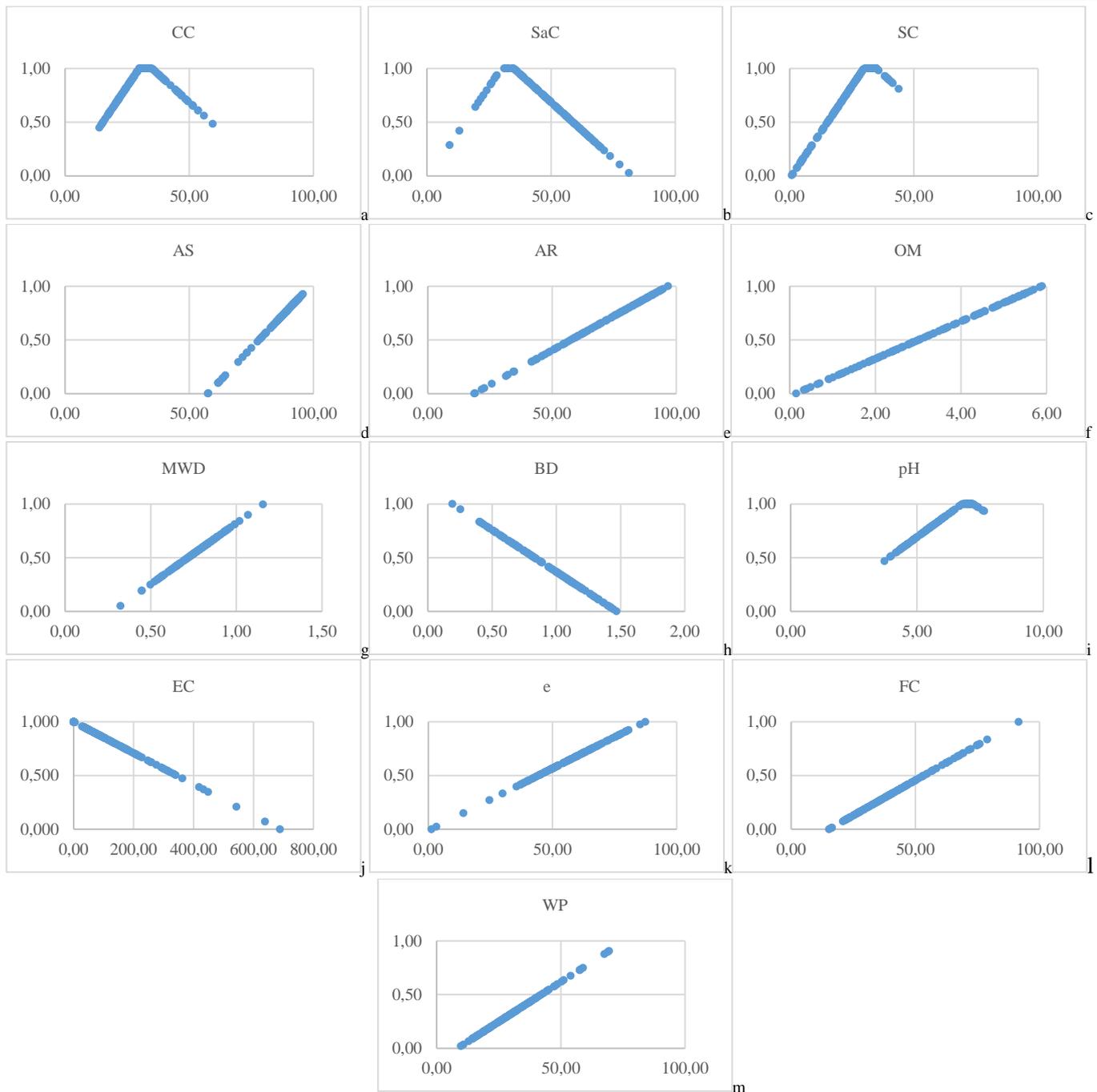


Fig.3. The scores of parameters

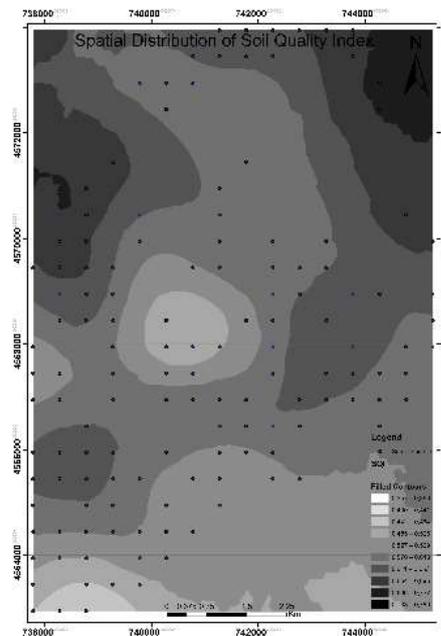


Fig.4. Spatial distribution map of soil quality index (SQI)

Conclusions

Soil Quality Index Using Principle Component Analysis can applied to determine the soil quality index and geostatistics can used to determine the spatial variability and mapping of soil quality index in a watershed. The soil quality index varied in watershed due to land use, cover percentage and elevation.

References

- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., Magner, J. A. (2012) *Hydrology and the Management of Watersheds*. Somerset, John Wiley & Sons, Incorporated, United States.
- Conklin A R (2005). *Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation*. Wiley, Hoboken NJ, USA
- Demiralay, İ. (1993). *Toprak Fiziksel Analizleri*, Atatürk Ü. Ziraat F. Yay. No: 143, 78-89, Erzurum.
- Gee, G.W., Bauder, J.V. (1986). *Particle Size Analysis, Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edition. Agronomy no:9. 383-411, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J. Doran, J.W. Cline, R.G. Harris, R.F. Schuman, G.E. (1997) Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Kemper, W, Rosenau, R. (1986) *Aggregate Stability and Size Distribution. Methods of Soil Analysis: Part I: Physical and Mineralogical Methods*. C. A. Black, D. D. Evans and R. C. Dinauer. Madison, American Society of Agronomy.
- Oliver, M.A., Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena* **113**: 56-69
- Schjonning, P., Elmholt, S., Christensen, B. T. (2003) *Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture*. Wallingford, UNITED KINGDOM: CABI.
- Schnitzer, M. (1991). Soil organic matter - the next 75 years. *Soil Science*. 151(1): 41-58.
- Smith, K. A., Mullins, C. E. (2000). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods, Revised, and Expanded*. Baton Rouge, UNITED STATES: Chapman and Hall/CRC.
- Turgut, B., Öztaş, T. (2012). Assessment of Spatial Distribution of Some Soil Properties with Geostatistics Method. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **7(2)**, 10-22.
- Van Bavel, C. (1950) Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society American Journal* **14(C)**, 20-23.



USING R AND LANDSAT-8 OLI IMAGERY FOR DIGITAL SOIL CLAY MAPPING IN A FIELD SCALE

Shahbazi F.¹, McBratney A.B.²

¹Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

shahbazi@tabrizu.ac.ir

²Sydney Institute of Agriculture & School of Life and Environmental Sciences, The University of Sydney, Eveleigh, NSW 2015, Australia

Alex.mcbratney@sydney.edu.au

Introduction

In soils, clay fraction is generally the most important adsorbents for inorganic metals and often for organic solutes as well due to its very high surface areas. The need for spatial information on clay at the field scale is increasing because it is applied in precision agriculture and environmental management such as soil workability timing (De la Rosa et al., 2009). The main reason for the lack of spatial data is simply that conventional soil survey methods are relatively slow and expensive.

Geostatistical techniques combined with ancillary data have been used with some success to improve the accuracy of spatial prediction of clay (Triantafylis et al., 2001). Derivatives of remotely sensed spectral data have also been widely used as environmental covariates in modeling soil-landscape relationships (McBratney et al., 2003). Therefore, digital soil mapping (DSM) evolved soil science disciplines. DSM has been widely used in many fields of soil science (Shahbazi et al., 2019a; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Malone et al., 2009). In this way, there is no further demand for soil surveying to recognize and monitor soil properties (Ma et al., 2017).

R is a software system for computations and graphics in DSM (Malone et al., 2017). In addition to understand the basic knowledge on soil genesis and landscape relationships, R literacy is also needed to model and map the spatial distribution of a soil attribute.

The shrunk bed of Urmia Lake (the east shore) located in the north west of Iran was selected to assess the spatial distribution of clay fraction as an important soil physical attribute using R and ancillary variables taken by landsat-8 OLI imagery (Malone et al., 2017). Boettinger et al. (2008) have also reported that those data have been particularly useful in arid and semi-arid areas. For this, eighteen remotely sensed data (environmental covariates) were employed for analysis. Multiple linear regression (MLR) was used as a work-horse candidate model for mapping the target variable across the study area and a bootstrapping method was used to analyze the associated uncertainty of the created map.

Objects and methods

Soil sampling and analysis

A distinct area with an extension of 275 km² was selected to predict the spatial distribution of clay fraction at the surface soils. It has located between 45°31'24" - 45°50'45" east longitude and 37°37'44" - 38°48'55" north latitude. More than 85% of the study area has been waterlogged since 20 years ago but the fresh materials were successfully raised above the water after 2010. The altitude varied between 1270-1278 m above sea level.

A total of 71 topsoil samples (0-10 cm) were collected from the study area according to the stratified random sampling method during June 2017. Samples were collected with a grid of 400 ha from the entire of the study area. The samples were then transported to the laboratory for preparation



and analysis as well as were air-dried, then sieved through a 2 mm sieve. Clay fraction as particles <0.002 mm was determined using the hydrometer method (Gee and Or, 2002).

Ancillary data

The study area is somewhat bare land with thinly shrubs. This causes to be detected the variation of soil properties at the terrain surface using remote sensing data. Therefore, we acquired cloud free of Landsat-8 OLI imagery of July 2017 (via USGS-EROS; <http://earthexplorer.usgs.gov/>). In addition to six spectral bands include B2 (0.45–0.51 μm), B3 (0.53–0.69 μm), B4 (0.64– 0.67 μm), B5 (0.85–0.88 μm), B6 (1.57–1.65 μm) and B7 (2.11– 2.29 μm), we calculated some indices to demonstrate vegetation, geology, landscape, soil and water characteristics (Table 1). All covariates were transformed to a spatial resolution of 30 m using ArcGIS 10.2 (ESRI, 2011).

Table 1. Ancillary data variables considered in this study (Shahbazi et al., 2019b)

| Ancillary data | Description | Definition |
|------------------------------------|--|--|
| Individual bands | Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2 | B2-B7 |
| PCA of bands | Principal component analysis of six individual bands | PCA (B2-B7) |
| False colour composite | Combination of B4, B5 and B6 | B456 |
| | Combination of B4, B6 and B7 | B467 |
| Vegetation, soil and water indices | Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) | $(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$ |
| | Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) | $((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L^*)) \times (1 + L)$ |
| | Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) | $(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue})$ |
| | Normalized Difference Moisture Index (NDMI) | $(\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$ |
| Landscape index | Normalized Burn Ratio 2 (NBR2) | $(\text{SWIR1} - \text{SWIR2}) / (\text{SWIR1} + \text{SWIR2})$ |
| Geology indices | Clay Index (CI) | $(\text{SWIR1} / \text{SWIR2})$ |
| | Salinity Ratio (SR) | $(\text{Red} - \text{NIR}) / (\text{Red} + \text{NIR})$ |
| | Ferrous Minerals Index (FMI) | $\text{SWIR1} / \text{NIR}$ |
| | Iron Oxide Index (IOI) | Red / Blue |

NIR: near infrared; SWIR1: shortwave infrared 1; SWIR2: shortwave infrared 2; *:The L value varies depending on the amount of green vegetative cover as well as in areas with moderate green vegetative cover, $L=0.5$.

Multiple linear regression

MLR is an extension of simple linear regression. It has been used for evaluating relationship between analytical and spectral parameters of six important classes of tropical Brazilian soils (Demattê et al., 2007); some soil properties in Burkina Faso (Forkuor et al., 2017); and also clay content in West Africa (Jones, 1973). This approach regress the clay fraction against provided eighteen environmental covariates. After putting all covariates in the model we performed a stepwise regression to determine statistically significant variables. To facilitate MLR model fitting in R we used “*rgdal*” package (Bivand et al., 2018). The fitted model was assessed using the root mean square error (RMSE); coefficient of determination (R^2); bias; and Lin's concordance correlation coefficient (Concordance).



Results and discussion

Descriptive statistics of measured clay fraction across the study area revealed that the collected soils varied from coarse to fine texture. The mean value and CV for the dataset were 43.5% and 37.82% respectively. The observations were also showed that there are distinct variations in all selected environmental covariates with increment the distance from the shore line (Fig. 1). For example, NDVI ranged from -0.19 to 0.34 as well as NDMI ranged from -0.07 to 0.65.

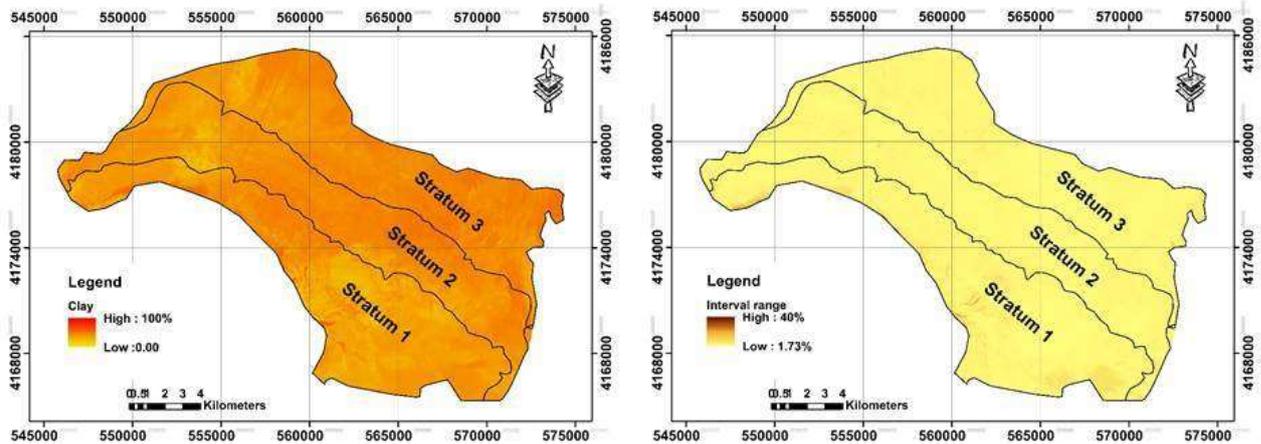


Fig.1. Digital maps of clay fraction associated with prediction interval range across the study area.

The results demonstrated that MLR was generally quite good with calibration ($R^2 = 0.31$) while it was not adequate well in validation dataset ($R^2 = 0.12$). The reason for trying MLR in digital mapping of clay fraction across the study area was that we could not find better than that (Shahbazi et al., 2019b). On the other hand, the highest concordance value in validation data set for clay prediction was observed in implementation of MLR. Based on the modelling procedure B2, B5, B6, B7, CI, FMI, NDMI, PCA and SAVI were significantly predictors of clay across the study area. Band 2 and NDMI ($P < 0.00$) were the most important covariates, followed by B6, B7, CI and PCA ($P < 0.001$) while B5, FMI and SAVI ($P < 0.01$) were the last ones.

Conclusions

Integrating the obtained outputs (using R) and GIS issued the spatial distribution of clay as well as prediction interval range maps (Fig. 1). The prediction interval which was calculated by the difference between upper and lower 90% limit of prediction bounds to define the level of confidence showed that in the direction from the first-to-third strata PI on average decreases. It means that the accuracy and precision of prediction of clay content was boosted with increments in distance from the shore. It is speculated that the variation observed may be related to soil formation processes such as soil ripening. Also, the nature of clay particles, which may differ over the strata, determines soil properties and their behaviours and a function largely governs some geomorphic processes such as weathering, erosion and deposition.

Acknowledgment

The work was carried out with the support of the University of Tabriz as a sabbatical leave of Dr. Farzin Shahbazi in the University of Sydney, Australia.



References

13. Bivand, R., Keitt, T. and Rowlingson, B. (2018) rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.3-6/r773. <https://R-Forge.R-project.org/projects/rgdal/>.
14. Boettinger, J.L., Ramsey, R.D., Bodily, J.M., Cole, N.J., Kienast-Brown, S., Nield, S.J., Saunders, A.M. and Stum, A.K. (2008) Landsat spectral data for digital soil mapping, in: Harteming, A.E., McBratney, A.B. and Mendonca-Santos, M. (Eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer, Dordrecht. pp. 193-203.
15. De la Rosa, D., Anaya-Romero, M., Diaz-Pereira, E., Heredia, N. and Shahbazi, F. (2009) Soil-specific agro-ecological strategies for sustainable land use—A case study by using MicroLEIS DSS in Sevilla Province (Spain). *Land Use Policy* **26**, 1055-1065.
16. ESRI (2011) ArcGIS Desktop: Release 10.2 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
17. Gee, G.W., Or, D. (2002) Particle-size analysis, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical methods*. Agron. Monogr. vol. 9. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp. 255-293.
18. Ma, Y., Minasny, B. and Wu, C. (2017) Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China. *Geoderma Reg.* **10**, 144-153.
19. Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B. (2017) *Using R for Digital Soil Mapping*. Springer, 271 pp.
20. Malone, B.P., McBratney, A.B., Minasny, B. and Laslett, G.M. (2009) Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* **154(1-2)**, 138-152.
21. McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L. and Minasny, B. (2003) On digital soil mapping. *Geoderma* **117(1-2)**, 3-52.
22. Shahbazi, F., Hughes, P., McBratney, A., Minasny, B. and Malone, B. (2019a) Evaluating the spatial and vertical distribution of agriculturally important nutrients — nitrogen, phosphorous and boron — in North West Iran. *Catena* **173**, 71-82.
23. Shahabzi, F., McBratney, A., Malone, B., Oustan, S. and Minasny, B. (2019b) Retrospective monitoring of the spatial variability of crystalline iron in soils of the east shore of Urmia Lake, Iran using remotely sensed data and digital maps. *Geoderma* **337**, 1196-1207.
24. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Nabiollahi, K. and Kerry, R. (2016) Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma* **266**, 98-110.
25. Triantafyllis, J. Huckel, A.I. and Odeh, I.O.A. (2001) Comparison of statistical prediction methods for estimating field-scale clay content using different combinations of ancillary variables. *Soil Science* **166**, 415-427.
- 26.



UDC 631.43

INCREASING SOIL STRUCTURE DIVERSITY UNDER AFFORESTATION

Fomin Dmitry^{1*}, Karsanina Marina², Gerke Kirill², Yudina Anna¹, Abrosimov Konstantin¹

¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russian Federation

* fomin_ds@esoil.ru

Annotation: Macro- and microscales structure features reflect the development of soil that is initiated by changes of vegetation. During 65-years afforestation contents of microaggregates and organic carbon are increased at 1 m layer. The diversity of soil structures grows from conventional agrosystems to oak forest plantation.

Introduction

One of the first investigations of the forestbelt impact on climate, yield and soil properties were implemented in the late 19th century (Tyulin, 1926; Tyulin, 1930). The biggest shelter forestbelt network was created as part of Great Plan for the Transformation of Nature during 1949-1963 years. Total surface area under forestbelts in USSR reached 1.3 million hectares (Pavlovskiy, 1986). Forestbelts were planted on arable Chernozems, which been continuously cultivated from the 17th century (Afanasieva, 1966). The goal of this study is describing of soil macro- and microstructure development under oak afforestation.

Objects and methods

The study site is experimental fields of Agro-Industrial Science Institute, Kursk region, Russian Federation. Soils were investigated in transect through 3 land use types - arable land with cereals rotation (CER) and bare fallow rotation (BF) and afforestation lands with oak plantation (AF) (**Fig. 1**). The sampling was carried out in 4 replicates by each 10 cm during 1 m depth.



Fig. 1. Scheme of experimental site.

Content and mean volume diameter (MVD) of microaggregates and granulometric organic carbon (OC) pools were calculated from particle size distribution (PSD) obtained by laser diffraction method with 3 types of pretreatment (PT): 1- intensive shaking, 2 - ultrasonic (US) disruption and 3 - oxidation plus US disruption. The properties of microaggregates were calculated from the difference of 1 PT minus 2 PT, fine (1-30 μm) and coarse (30-2000 μm) OC pools – from the difference of 2 PT minus 3 PT. For macroscale of soil structure, undisturbed soil samples (H=5 cm, D=3 cm) were scanned by X-ray computer microtomography (μCT) on SkyScan 1172 (Bruker, USA). In μCT images we computed directional correlation functions for a library of processed soil images and then described them by a limited number of parameters. This was done by fitting experimental correlation functions from images with superpositions of classical basic functions.



Results and conclusions

After 60 years under oak plantation we can note that SOC increase in 1 m layer (Fig. 2).

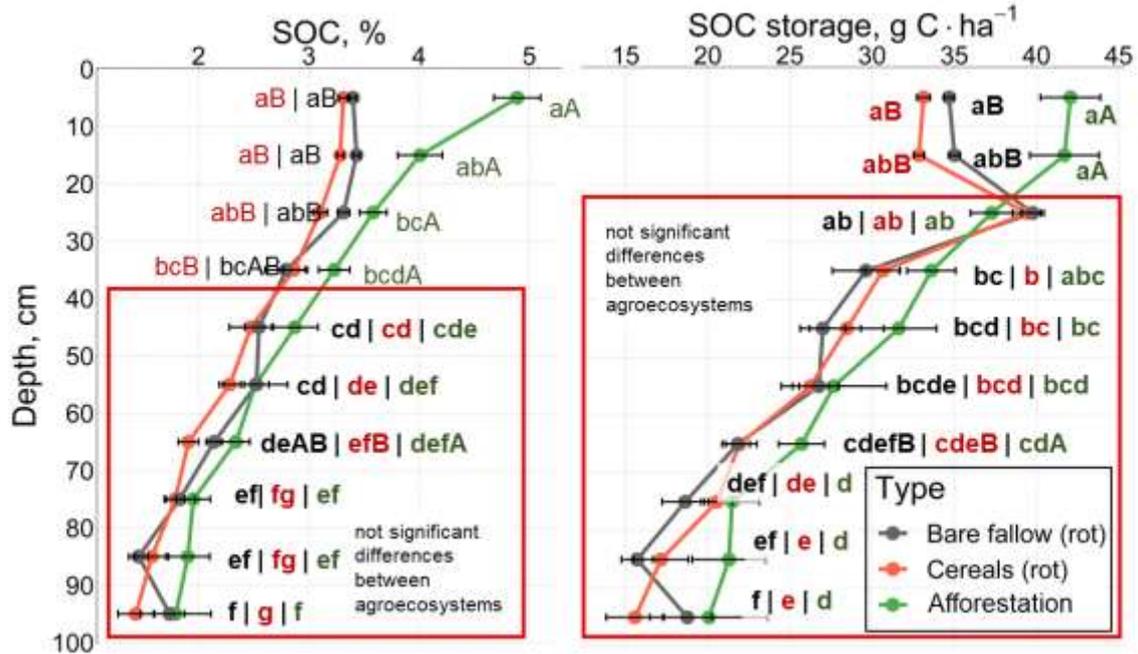


Fig. 2. Profile distribution of soil organic carbon

The most intense changes of microaggregates content and sizes are observed in the soil top layer. Content of microaggregates (250-2000 μm) is higher in A horizon of soil under forestbelt compare to arable soils. Fine OC pool (1-30 μm) decreases under Oak due to formation of large microaggregates. Coarse OC pool (30-2000 μm) is the highest in soil under Oaks. The soil structure diversity of humus horizon grows from arable lands to afforestation lands (Fig. 3).

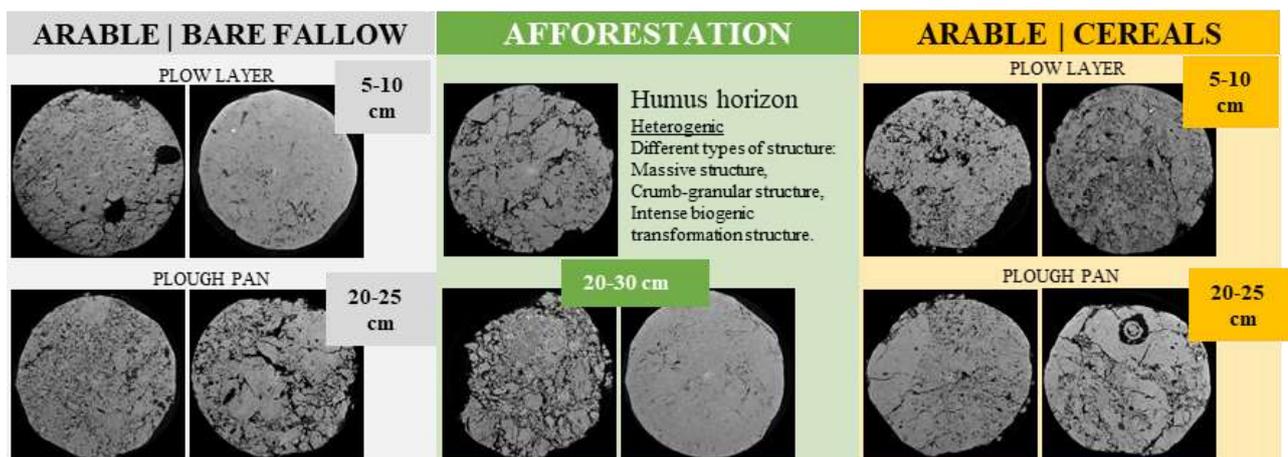


Fig. 3. XCT images of different land use types and depths.

Our results show the possibility to reduce or “compress” soil structural information. In addition, correlation functions seem to be much more sensitive to scale variations than max pooling in e.g., convolutional neural networks.

Acknowledgment The reported study was funded by RFBR according to the research projects № 18-316-00139 and № 18-34-20131; with the involvement of the equipment of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute CCU SO “Functions and properties of soils and soil cover”.



УДК 631.48

ДИНАМИКА КЛИМАТА В ГОЛОЦЕНЕ И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ В ПОЧВЕННОЙ СТРУКТУРЕ

Бухонов А.В.

ФИЦ ПНЦБИ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Московская область, г. Пушкино, Российская Федерация.

BuhonovAV@mail.ru

DYNAMICS CLIMATE IN HOLOCENE AND ITS REFLECTION IN SOIL STRUCTURE

Bukhonov A.V.

Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences
Moscow Region, Pushchino, Russian Federation

Annotation: investigated the structural composition of different-age kastanozems soils and their exposed analogues. The purpose of the study was to establish the peculiarities of the variability of the soil structure depending on the time the soil was in the buried state. It was established that the structure of the buried soils is preserved after burial. The structural composition of kastanozems is specific and determined by the climatic conditions that existed at the time of the burial.

Введение

Одним из важнейших свойств почвенного профиля является формирование почвенной структуры, которая определяет функционирование почв в биосфере. Она участвует в регулировании глобальных циклов азота и углерода, определяет устойчивость почв к неблагоприятным воздействиям и является одной из основ поддержания почвенного плодородия.

Благодаря применению почвенно-археологического метода были достигнуты значительные успехи в реконструкции условий формирования и функционирования палеопочв (Борисов, 2006; Дёмкин, 2010). Менее изученными оказались генетические основы развития почвенной структуры во времени. Известны лишь единичные работы по изучению сохранности почвенной структуры после перехода почвы в погребенное состояние (Wesche and Treiber, 2012; Deák et al. 2016).

Такие исследования позволяют определить степень сохранности и пределы устойчивости почвенной структуры в зависимости от длительности погребения и расширить перечень характеристик используемых для реконструкции условий палеосреды.

Уникальными объектами для изучения процессов эволюционного развития почвенной структуры являются почвы погребенные под разновозрастными археологическими памятниками – курганами. Время сооружения курганов определяется их культурной принадлежностью, а морфолого-химический анализ установить биоклиматические условия, в которых почва функционировала до момента погребения. Достоверность палеопочвенных реконструкций определяется степенью сохранности исходного состояния палеопочв. Наилучшая сохранность палеопочв достигается в автоморфных целинных ландшафтах при уровне залегания грунтовых вод глубже десяти метров от современной поверхности.

Цель работы заключалась в исследовании структурно-агрегатного состава разновозрастных погребенных каштановых почв расположенных на территории Нижнего Поволжья, определении степени его сохранности в зависимости от времени нахождения в погребенном состоянии и изучение закономерностей изменения структурного состава в связи с динамикой увлажненности климата в голоцене.



Объекты и методы

Объектами исследования послужили каштановые палеопочвы курганного могильника «Саломатино». Могильник расположен в Камышинском районе Волгоградской области на правом берегу р. Иловля приблизительно в 5 км от с. Саломатино. Участок целинный, абсолютные отметки поверхности составляют 170–175 м. В растительном покрове доминируют разнотравно-типчаково-ковыльная растительная ассоциация с проективным покрытием около 85-90%. В почвенном покрове на водоразделах и высоких надпойменных речных террасах преобладают каштановые почвы в сочетании с солонцами.

Курганная группа включает в себя три кургана, время сооружения которых соответствует эпохе поздней бронзы (~3500 л.н.), раннего железа (~1700 л.н.) и средневековья (~700 л.н.). Время сооружения курганов определено на основе анализа погребальных комплексов археологическими методами (Демкин, 2010). В месте наилучшей сохранности закладывались почвенные разрезы, проводилось морфолого-генетическое описание почвенных профилей и отбор образцов на химические анализы. Химические свойства погребенных и современных почв определяли стандартными аналитическими методами: содержание органического углерода в почвах и структурных отдельностях – мокрым сжиганием по Тюрину (Аринушкина, 1970). Структурно-агрегатный состав – стандартным методом фракционирования почв на ситах 10–0.25 мм в воздушно-сухом состоянии (Вадюнина, 1973]. Классификация размерных частиц и структурных отдельностей приведена по шкале Качинского (Качинский, 1963). При анализе данных, полученных методами фракционирования на ситах, использовались стандартные показатели: – глыбистость почвы (Г) – сумма агрегатов >10 мм, %; – агрегированность (А) – сумма агрегатов размером от 10 до 0.25 мм, %; – распыленность (Р) – микроагрегаты <0.25 мм; коэффициент структурности $K_{стр} = a/(b+c)$ где а – содержание агрегатов 0.25-10 мм, %, b- содержание агрегатов <0.25 мм, с – содержание агрегатов >10 мм (Филлипович, 1956). Статистическими методами с использованием программы Statistica-6 исследовали взаимосвязь между структурными характеристиками, физическими, химическими параметрами почв и длительностью их погребения.

Результаты и обсуждение

Почва, погребенная 3500 л.н., диагностирована как каштановая несолонцеватая солончаковатая. Признаки солонцового процесса не выражены на макроуровне. Мощность гумусовых гор. А1+В1 составляет в среднем 24 ± 1.5 см (n=7). Вскипает с 12 см. Содержание карбонатов в зоне аккумуляции (гор. В2_{Ca}) не превышает 4%. Реакция среды щелочная, величина рН колеблется от 8.3 в гор. А1 до 8.8 в гор. В2_{Ca}. Содержание С_{орг} очень низкое.

Почва, погребенная 1700 л.н., диагностирована как каштановая солонцеватая солончаковатая. Мощность гумусового слоя погребенной почвы составляет 33 ± 1 см (n=7). Вскипает с глубины 32 см. Реакция среды щелочная по всему профилю.

Почва, погребенная 700 л.н., диагностирована как каштановая несолонцеватая незасоленная. Мощность гумусового слоя составляет 40 ± 1.5 см (n=7). Вскипает с глубины 75 см. Содержание органического углерода уменьшается от 0.91 в гор. А_д до 0.52% в гор. В1. Значение величины рН по профилю увеличивается от 7.0 (гор. А1) до 9.2 в почвообразующей породе.

В современном почвенном покрове преобладают каштановые несолонцеватые глубокозасоленные почвы. Мощность гумусового слоя составляет 53 ± 3 см (n=12). Вскипание отмечается с 65 см. Реакция среды в верхних горизонтах близка к нейтральной, глубже – щелочная (табл.1).



Таблица 1. Физико-химические свойства каштановых почв курганного могильника “Саломатино”.

| Горизонт | Глубина, см | pH H ₂ O | C _{орг} % | CaCO ₃ | CaSO ₄ | Содержание фракции, % | |
|-----------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------|
| | | | | | | <0.001 мм | <0.01 мм |
| Палеопочва погребенная 3500 л. н. | | | | | | | |
| A1 | 0–11 | 8.3 | 0.81 | 1.8 | 0 | 6 | 31 |
| B1 | 11–24 | 8.7 | 0.50 | 3.0 | 0 | 14 | 37 |
| B2Ca | 24–34 | 8.8 | 0.48 | 1.5 | 0 | 11 | 18 |
| Палеопочва погребенная 1700 л. н. | | | | | | | |
| A1 | 0–12 | 8.7 | 1.17 | 1.6 | 0 | 5 | 23 |
| B1 | 12–33 | 9.1 | 0.96 | 1.5 | 0 | 18 | 47 |
| B2Ca | 33–47 | 9.3 | 1.00 | 12.4 | 0 | 23 | 47 |
| Палеопочва погребенная 700 л. н. | | | | | | | |
| Ад | 0–6 | 8.3 | 1.23 | 0 | 0 | 4 | 12 |
| A1 | 6–21 | 7.0 | 1.26 | 0 | 0 | 11 | 27 |
| B1 | 21–40 | 6.8 | 0.97 | 0 | 0 | 23 | 44 |
| B2Ca | 40–50 | 7.6 | 0.67 | 0.7 | 0 | 13 | 26 |
| Современная почва | | | | | | | |
| Ад | 0–11 | 6.7 | 2.04 | 0 | 0 | 2 | 19 |
| A1 | 11–30 | 6.5 | 1.05 | 0 | 0 | 9 | 21 |
| B1 | 30–53 | 7.3 | 0.98 | 0 | 0 | 30 | 34 |
| B2Ca | 53–65 | 8.2 | 0.73 | 0.86 | 0 | 16 | 31 |

Содержание органического углерода в гор. А1 составляет 2% и постепенно снижается с глубиной. Почвенная толща до 65 см промыта от карбонатов и легкорастворимых солей.

Таким образом, полученный материал охватывает период от эпохи поздней бронзы до современности. Различия в структурном составе каштановых почв по содержанию воздушно-сухих агрегатов разного размера за последние 3500 лет в профиле незначительны (рис. 1).

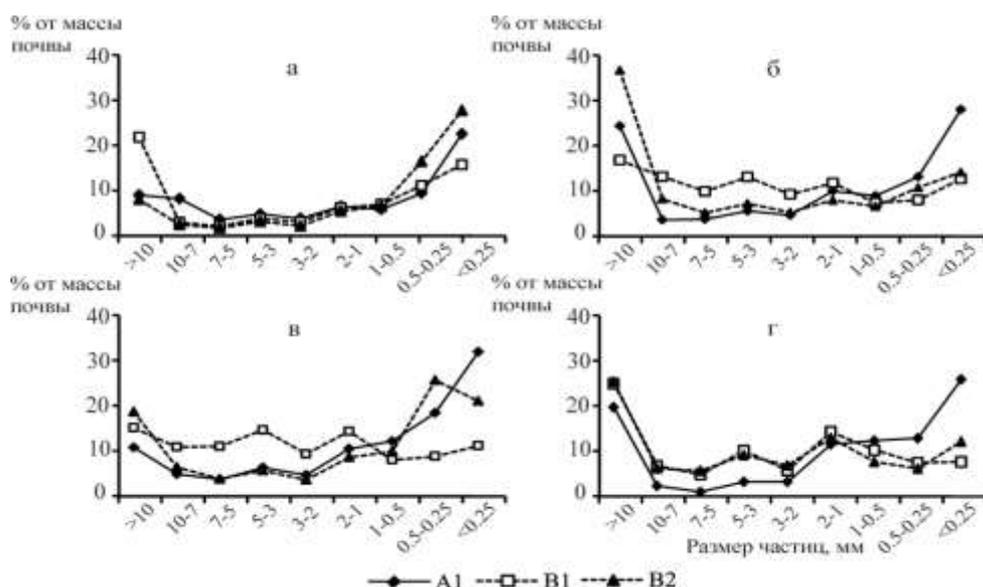


Рис. 1. Распределение содержания воздушно-сухих агрегатов в профилях каштановых почв, погребенных: 3500 (а), 1700 (б), 700 л.н. (в) и современных почв (г).



В составе агрегированной фракции гор. А1 содержание размерных фракций изменяется в почвах хроносрезов однотипно, увеличиваясь с уменьшением размера агрегатов. В иллювиальных горизонтах незначительно варьирует только содержание отдельных размерных фракций. Несмотря на однотипность распределения воздушно-сухих агрегатов в почвах разных хроносрезов, фракционно-агрегатный состав каштановых почв изменялся за последние 3500 лет. В структурном составе гумусового горизонта на долю наиболее ценных агрегатов (10–0.25 мм) приходится от 46 до 59%, и по этому показателю все погребенные почвы обладают хорошим агрегатным состоянием (табл.2).

Таблица 2. Фракционно-агрегатный состав и коэффициент структурности гумусового горизонта погребенных и современных почв.

| Время погребения, лет назад | Содержание фракции, % | | | А/Г | K _{стр} |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|-------------|-----|------------------|
| | глыбистая | агрегированная | распыленная | | |
| 3500 | 12 | 56 | 32 | 4.6 | 1.28 |
| 1700 | 25 | 46 | 29 | 1.8 | 0.86 |
| 700 | 10 | 59 | 31 | 5.7 | 1.41 |
| Современность | 20 | 66 | 14 | 3.3 | 1.18 |

Почвы, погребенные 3500 и 700 л.н., не уступают по агрегированности современным почвам. Вероятно, это связано с климатическими условиями, существовавшими на момент предшествующий погребению. Для региона исследований показано, что в эпоху поздней бронзы почвы развивались в относительно гумидных условиях. Ранний железный век характеризовался чередованием аридных и плювиальных периодов. При этом период II–III вв. н.э. характеризовался более аридными условиями почвообразования. С эпохой развитого средневековья (XIII–XIV вв. н.э.) связан очередной период гумидизации, характеризуемый как средневековый оптимум. Анализ распределения структурных отдельностей агрегированной фракции позволил установить, что в эволюционном хроноряду почв содержание агрегатов размером от 10 до 2 мм в течение 3500 лет было минимально в палеопочвах аридных периодов, увеличиваясь в палеопочвах, погребенных в периоды гумидизации (рис. 2)

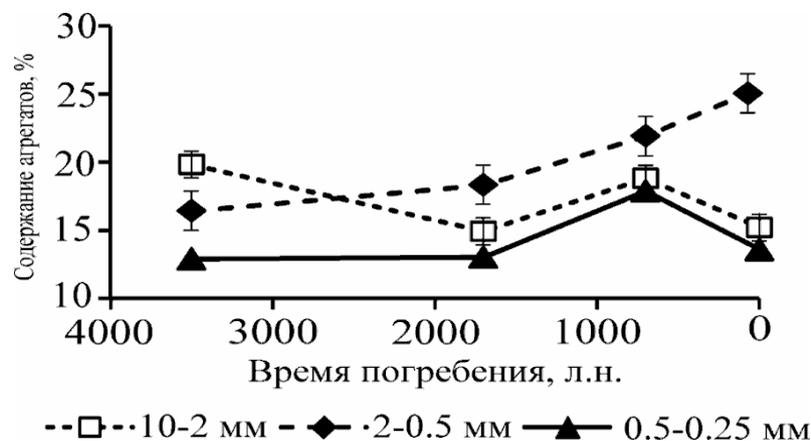


Рис. 2. Изменения структурно-группового состава каштановых почв в течение последних 3500 лет.



Формирование этой группы агрегатов преимущественно связано с почвенным органическим веществом: корнями растений, гифами грибов, а также, лабильными формами гумусовых соединений (Когут, 2012). Содержание агрегатов размером 2–0.5 мм за последние 3500 лет почти линейно увеличивалось, отражая направленную эволюцию структуры, а доля зернистых частиц размером 0.5–0.25 мм практически постоянна в эволюционном ряду в процессе почвообразования.

Выводы

1. Различия значений интегральных характеристик макроструктуры каштановых почв, свидетельствуют о том, что агрегатный состав сохраняется после погребения.

2. Структурно-агрегатный состав каштановых почв за последние 3500 лет изменялся, эти изменения были ритмичны и связаны с динамикой климата в регионе.

3. Изменения агрегатного состава в связи с климатическими флуктуациями отчетливее выражается отношением А/Г. В палеопочвах гумидных эпох это отношение выше, а в аридные эпохи ниже. Значения интегральных характеристик структуры, используемых для оценки качественного состояния изученных почв, связаны с колебаниями увлажненности климата.

4.

Благодарность

Работа выполнена по теме Государственного задания № 0191-2019-0046

Литература

- Аринушкина Е.В. (1970) Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 490 с.
- Борисов А.В., Демкина Т.С., Демкин В.А. (2006) Палеопочвы и климат Ергеней в эпоху бронзы (IV–II тыс. до н.э.) // М. Наука, 210 с.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1973) Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высшая школа, 398 с.
- Демкин В.А., Борисов А.В., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Золотарева Б.Н., Каширская Н.Н., Удальцов С.Н., Ельцов М.В. (2010) Волго-Донские степи в древности и средневековье // Пушино, 120 с.
- Качинский Н.А. (1963) Структура почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 101 с.
- Когут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А. (2012) Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. № 5. С. 555–561.
- Филлипович З.С. (1956) Поглощение коллоидов почвами и образование структуры // Почвоведение. № 2. С. 16–26
- Deak B, Tothmeresz B, Valko O et al. (2016) Cultural monuments and nature conservation: a review of the role of kurgans in the conservation and restoration of steppe vegetation. *Biodivers Conserv.* doi:10.1007/s10531-016-1081-2
- K. Wesche, J. Treiber (2012) Abiotic and biotic determinants of steppe productivity and performance – a view from Central Asia. M.J.A. Werger, M.A. van Staaldunin (Eds.), *Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World*, Springer, Dordrecht, pp. 3-43.



УДК 631.4

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВРЕМЕННОГО ХОДА НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Глазунов Г.П.¹, Евдокимова М.В.¹, Титарев Р.П.¹, Шестакова М.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

mawkae@gmail.com

REGULARITIES OF TIME COURSE OF SOME INDICES OF SPECTRAL REFLECTIVITY OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA AND THEIR CONNECTION WITH SEASONAL AND INTERANNUAL DYNAMICS OF PHYTOMASS INDICES

Glazunov G.P., Evdokimova M.V., Titarev R.P., Shestakova M.V.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: The approach to revealing the regularities of temporal variability of photosynthetically active biomass on the basis of data analysis (Landsat 8; Sentinel-2) of remote sensing of the Earth using the theoretical equation derived earlier in the framework of the laws of conservation of mechanics and macroscopic chemical kinetics of living reacting systems is substantiated.

Введение

В рамках данной работы нами поставлена задача обоснования применимости к анализу закономерностей временного варьирования показателя вегетационного индекса (NDVI) теоретической модели, выведенной нами ранее в рамках законов сохранения механики и макромолекулярной химической кинетики реагирующих биологических систем с использованием представлений сплошной среды для биологических систем, растущих на одно- и многокомпонентных субстратах (Гендугов, Глазунов и др., 2013, 2014). Возможность такого подхода подтверждается успешной проверкой адекватности этой теоретической модели экспериментальным данным по микробному росту и росту высших растений (Глазунов, Гендугов, Харчук, 2013). Преимуществом данной теоретической модели является то, что, в случае её адекватности экспериментальным данным, она позволяет выявить скрытые закономерности динамики и пространственного варьирования и получить содержательные показатели динамики растущей системы, а также показатели её отклика на воздействие химических стрессоров объективными методами анализа временных рядов.

Объекты и методы

Районом исследования был участок «Ямская степь» государственного природного заповедника «Белогорье», расположенного на северо-востоке Белгородской области. Исследуемая территория расположена в бассейне реки Оскол на выровненном водоразделе, покрытом преимущественно миграционно-мицеллярными чернозёмами на карбонатных лёссовидных суглинках и глинисто-иллювиальными чернозёмами на бескарбонатных лёссовидных суглинках под различными вариантами степей (Русаков, 2012).

В качестве меры концентрации фотосинтетически активной биомассы на мониторинговых площадках, каждой из которых был поставлен в соответствие один пиксель, использован вегетационный индекс NDVI, значения которого находили по материалам USGS (Landsat - 8) и Copernicus (Sentinel - 2), полученным из открытых источников: <https://earthexplorer.usgs.gov> и <https://scihub.copernicus.eu>.



Временную динамику концентрации фотосинтетически активной биомассы, моделировали с использованием решения, полученного ранее (Гендугов, Глазунов, 2014) в рамках представлений сплошной среды:

$$q = \alpha (tz)^{-B} \exp\left(\frac{-\kappa}{tz}\right). \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения (1) представляют собой свёртки стехиометрических коэффициентов химических и биохимических реакций, определяющих динамику концентрации фотосинтетически активной биомассы q , а выражение для результирующей z

(мкг/г) начальных концентраций c_{i1}° компонентов субстрата имеет вид $z = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (c_{i1}^{\circ})}$.

Поскольку среднее геометрическое из начальных концентраций всех компонентов субстрата для каждой мониторинговой площадки постоянно, $z = const$, его введение в константы уравнения (1), $\alpha z^{-B} = \lambda$ и $\kappa/z = k$, приводит к формуле зависимости показателя концентрации фотосинтетически активной биомассы от времени

$$q = \lambda e^{-k/t} t^{-B}. \quad (2)$$

В этом уравнении λ – масштабирующий коэффициент, k – коэффициент скорости увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в течение вегетационного сезона в результате её роста и B – коэффициент скорости убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате отмирания (и рост и отмирание идут одновременно с разными, изменяющимися с течением времени, скоростями).

Результаты и обсуждение

Уравнение (2), полученное в предположении постоянства z адекватно экспериментальным данным по сезонной динамике вегетационного индекса на всех мониторинговых площадках в 2015 и в 2016 гг. по материалам Landsat 8 (Рис. 1, 2) и в 2017 г. по материалам Sentinel - 2. (Рис. 3) Это позволило определить коэффициенты модели, что, в свою очередь, позволило решением уравнений первой, второй и третьей производных от вегетационного индекса по времени, определить шесть особых точек, разграничивающих семь фаз роста, характеризующих собственным сочетанием состояний макрокинетических характеристик (концентрации фотосинтетически активной биомассы, характеризующей значением NDVI, а также скоростей и ускорений её роста). Об исключительно высокой точности коэффициентов модели (2) для всех мониторинговых площадок свидетельствует малый разброс экспериментальных точек вокруг теоретической кривой - практически все они вошли в 95%-ный доверительный интервал (Рис. 1, 2 и 3). Отличительной особенностью уравнения (2) является то, что его правая часть стремится к нулю и при стремлении времени к нулю и при стремлении времени к бесконечности, что не противоречит общебиологическим представлениям.

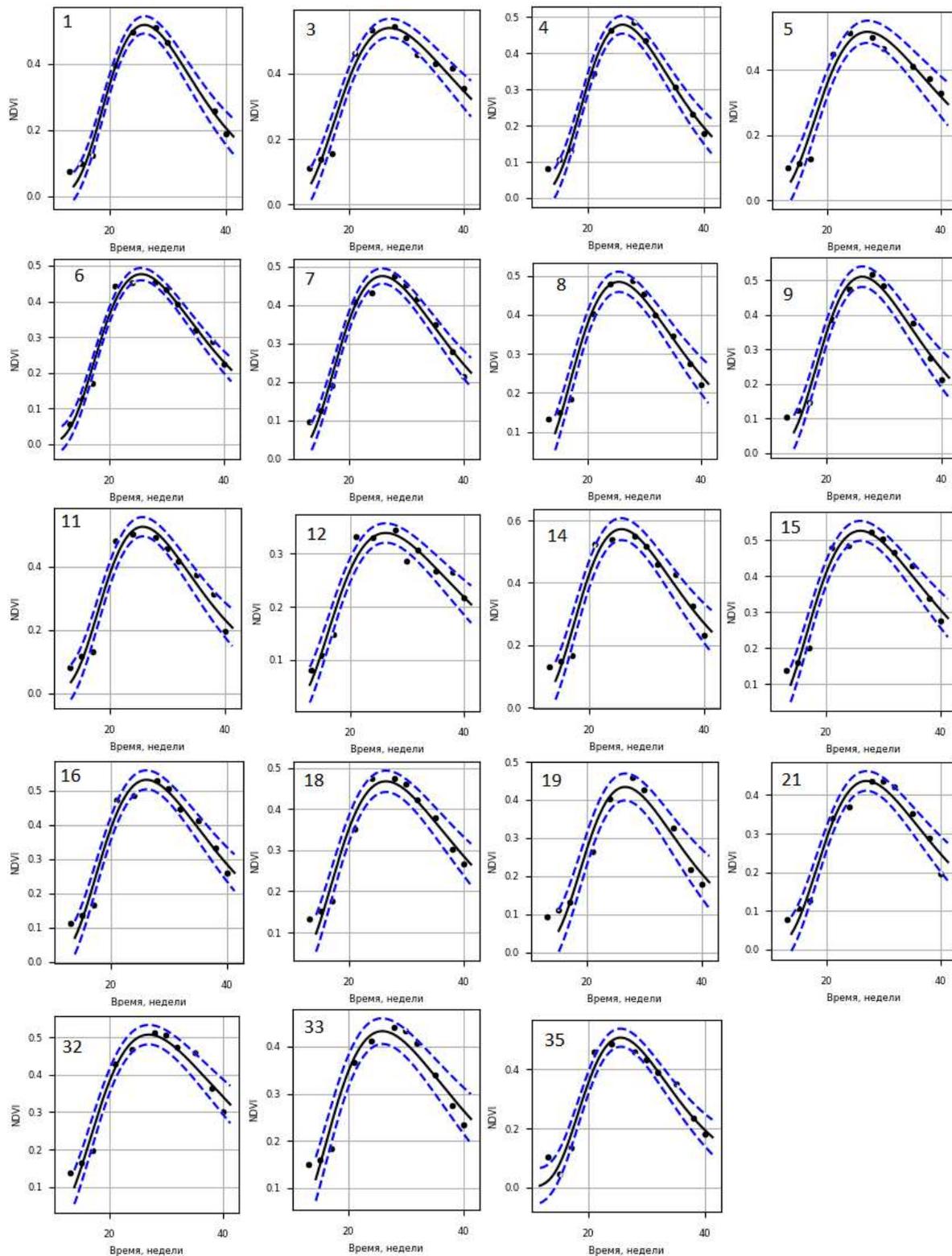


Рис. 1. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI (Landsat - 8) на мониторинговых площадках заповедника «Ямская степь» в 2015 г. (цифра в левом верхнем углу – код площадки, точки – эксперимент, сплошная линия – по уравнению (2), пунктирные – доверительные интервалы для модели).

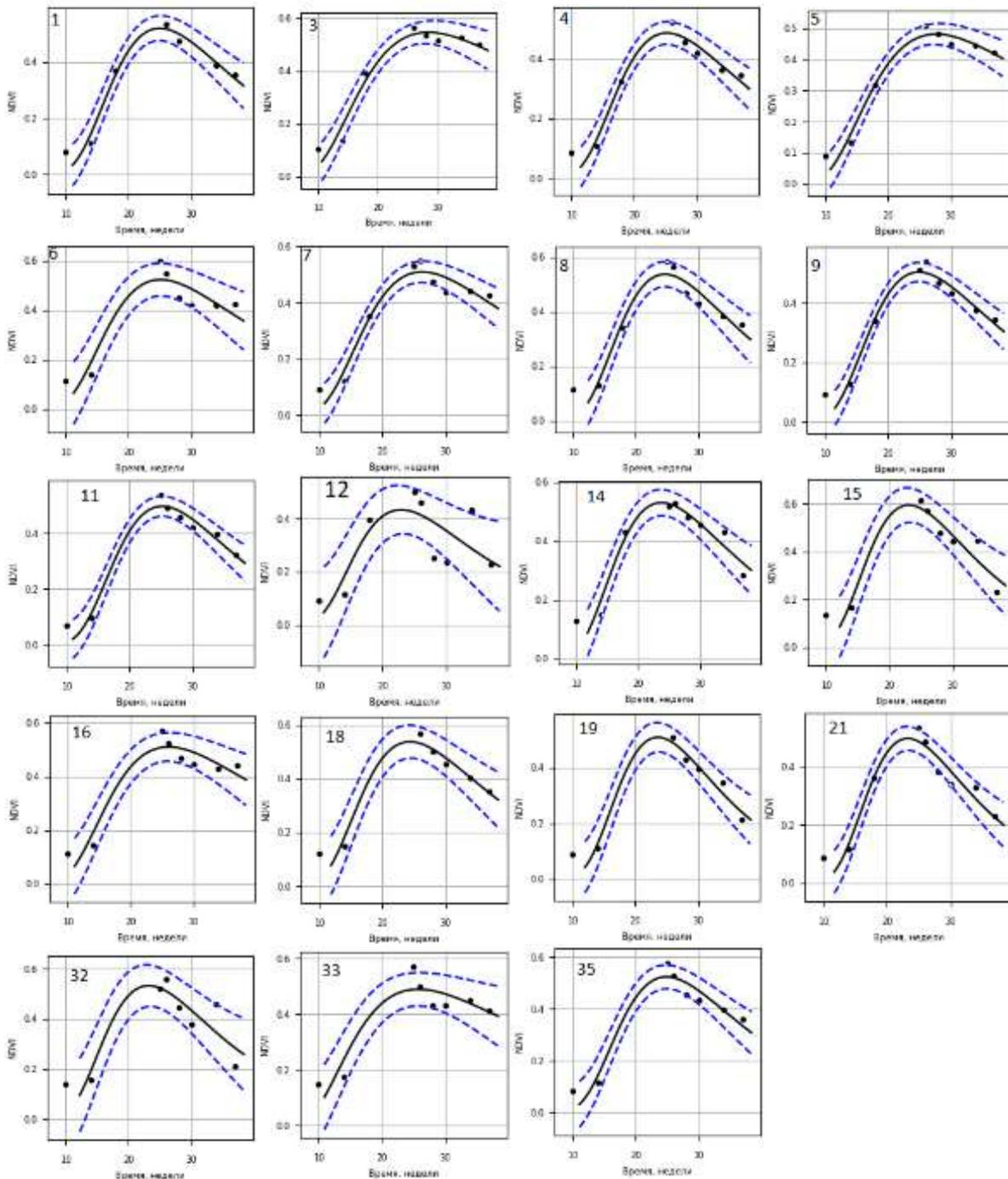


Рис. 2. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI (Landsat - 8) на мониторинговых площадках заповедника «Ямская степь» в 2016 г. (цифра в левом верхнем углу – код площадки, точки – эксперимент, сплошная линия – по уравнению (2), пунктирные – доверительные интервалы для модели).

Выводы

Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI (Landsat – 8; Sentinel - 2) на всех мониторинговых площадках в заповеднике «Ямская степь» подчиняется уравнению (2), причём константы и особые точки уравнения являются индивидуализирующими характеристиками площадок в данном сезоне.

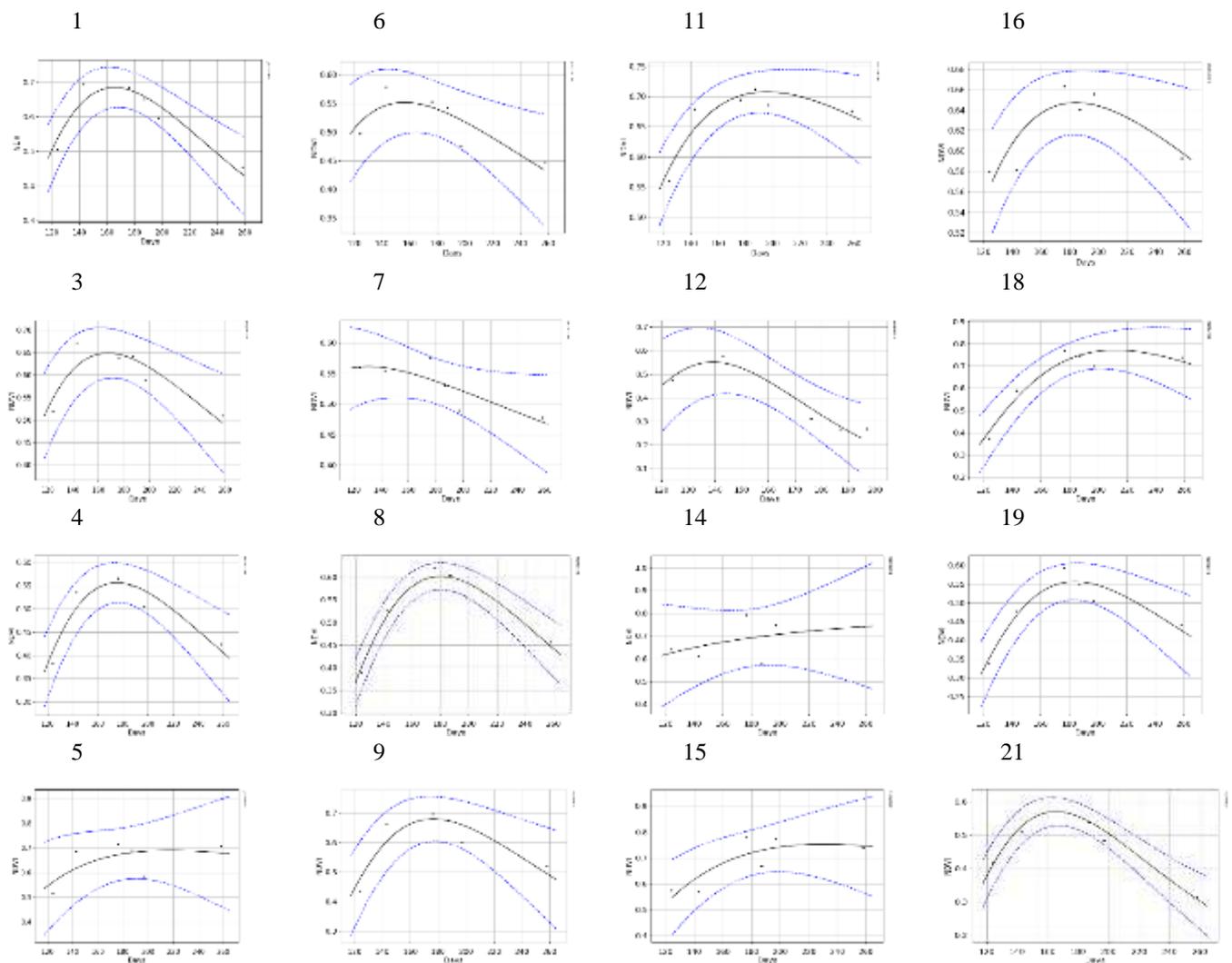


Рис. 3. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI (Sentinel - 2) на мониторинговых площадках заповедника «Ямская степь» в 2017 г. (цифра в левом верхнем углу – код площадки, точки – эксперимент, сплошная линия – по уравнению (2), пунктирные – доверительные интервалы для модели).

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 18-34-00037 мол_а).

Литература

Гендугов В.М., Глазунов Г.П., Евдокимова М.В., Шестакова М.В. Макрокинетическое обоснование модели микробного роста при одном ведущем компоненте субстрата // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2013. №2. С. 25-30.

Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 10-16.

Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Харчук О.А. Макрокинетическая модель роста, учитывающая лимитирующий компонент субстрата // Сб. тезисов Всероссийской научной конференции с международным участием "Инновационные направления современной физиологии растений". 2013. С. 48-49.

Русаков А.В. Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012.



УДК 631.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПРИБАЙКАЛЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА В РЕГИОНЕ

Гранина Н.И.¹, Мартынова Н.А.², Киселева Н.Д.³

Биолого-почвенный факультет ИГУ, Иркутск, Российская Федерация
granina_n@list.ru¹, natamart-irk@yandex.ru², nata_kis71@list.ru³

SPATIO-TEMPORAL HETEROGENEITY OF THE SOIL COVER OF BAIKAL REGION AND ITS IMPACT
ON THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE AT THE REGION

Granina N.I., Martynova N.A., Kiseleva N.D.

Faculty of biology and soil science of Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Annotation: The soil cover of the territory of Baikal region is characterized by a significant variety, and the structure of soil cover – by a high complexity due to complex geological history of the region, to the influence of tectonic processes of the Baikal rift zone, to the wide spread of young mountain systems, island permafrost and other factors. Distribution of loess rocks at the territory of the forest-steppe zone of Baikal region contributes to the genesis of fertile soils, but increases the heterogeneity of soil cover, which should be taken into account in agricultural land use.

Введение

Для увеличения посевных площадей и более рационального использования земельных ресурсов Прибайкалья необходимо глубокое изучение неоднородности почвенного покрова (ПП), типологии почв, их генезиса и свойств, особенностей влияния на них различных факторов, что и определяет цель и актуальность исследования.

Расположение Иркутской области в центре Азиатского материка, на стыке двух крупных тектонических структур – Сибирской платформы и древнего складчатого обрамления – Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), в зоне резко-континентального климата, наряду с влиянием сибирского антициклона - обуславливают большую пестроту физико-географических условий развития территории и неоднородность почвенного покрова.

Природно-ресурсное районирование Байкальской Сибири выделяет для территории Иркутской области 2 основных района (Атлас., 2009): 1) *Ангаро-Ленский район* Сибирской платформы с тремя подрайонами: Иркутско-Тулу́нским (Иркутской впадины Присаянского прогиба), Братско-Усть-Илимским (Катангской седловины и Братского выступа) и Непско-Биотубинским (Ангаро-Ленской ступени и Непско-Биотубинской антеклизы); 2) *Саяно-Байкальский район* Байкальской складчатой системы (БСС) с 4 подрайонами: Восточно-Саянским, Прибайкальским (краевого геоантиклинального поднятия), Северо-Байкальским (С.-В. крыла) и Витимским (Ю.-В. крыла).

Геология наиболее сельскохозяйственно-освоенной территории лесостепной зоны Прибайкалья представлена широким распространением и выходом на поверхность суглинистых отложений юрского возраста и красноцветных алевролитов карбонатно-силикатного состава осадочного генезиса - верхне-кембрийского, элювиально-делювиальные толщи которых подвержены на склонах интенсивным процессам эрозии. Рельеф лесостепной зоны, входящей в структуру Лено-Ангарского полого-волнистого плато, изрезан глубокими древними речными долинами и представлен чередованием антиклинальных гряд и синклинальных впадин с большой амплитудой колебания относительных высот (до 300 м). Процессы денудационного выравнивания рельефа, начавшегося с мел-палеогенового



времени, привели к развитию долин и придолинных поверхностей неоген-четвертичного времени, балок и других форм мезо- и микрорельефа. Деятельность эолово-склоново-водно-эрозионных процессов проявляется в форме ячеек выдувания, дюн, делей, делювиальных шлейфов, оврагов и промоин, хорошо диагностируемых на аэрокосмоснимках (рис.1) и снижающих качество сельхозугодий.

Объекты и методы

Объектом данного исследования является почвенный покров Прибайкалья, его неоднородность и влияние на развитие сельского хозяйства в регионе. Исследование выполнено на основе собственных полевых и лабораторных исследований авторов, а также – на основе анализа литературного материала с использованием почвенно-морфологического, педолитологического, генетико-классификационного, сравнительно-исторического и сравнительно-географического и др. подходов и методов исследования, дешифрирования аэрокосмоснимков дистанционного зондирования Земли, анализа структур почвенного покрова (СПП), факторов и условий почвообразования.

Результаты и обсуждение

На почвообразование в Прибайкалье особенно повлияла смена климатических условий в голоцене-плейстоцене, что выражается в «наложении» современных процессов почвообразования на профили более древних почв, формировании погребенных горизонтов. Аридный климат плиоцена способствовал замене на большей части Иркутской области широколиственных лесов тургайской флоры на мелколиственные биоценозы и формирование степной и полупустынной растительности и накоплению мощных толщ пылеватых отложений. Благодаря высокой тектонической активности последующих периодов окончательно сформировались горные системы юга Восточной Сибири, что обусловило развитие здесь горно-долинных оледенений. Холодный и сухой климат плейстоцена (сартанское время) обусловил глубокое мерзлотное растрескивание почвенного покрова долинных территорий и формирование «ядер» жильного льда (Воробьева, 1988), деградация и вытаивание которого во время последующего потепления климата привели к ксерофитизации биоценозов и формированию бугристо-западинного рельефа (Кузьмин, 2005), хорошо проявляющегося на космоснимках исследуемой территории характерным «сетчатым» строением поверхности (рис. 1а, б).

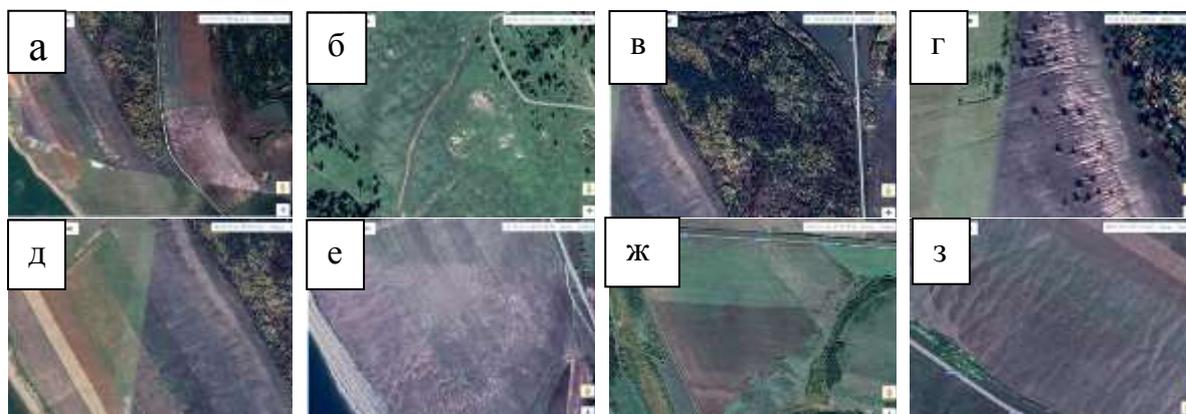


Рис. 1. Космоснимки рельефа и структур почвенного покрова Лено-Ангарской лесостепи на примере Балаганского района Иркутской области (пояснения в тексте)

Постледниковые потепления плейстоцена и голоцена способствовали отложению лессового материала сложного водно-ледникового и эолового генезиса. На средних и нижних



частях склонов увалов отложения кембрийских алевролитов часто перекрыты лёссами и лессовидными карбонатными суглинками мощностью 4-5 м (в отдельных местах - до 15 м), «плащом» покрывающие большие пространства Иркутской области, что способствует формированию на них плодородных черноземных и серых почв.



Рис. 2. Карта почв и почвенных комплексов Иркутской области (Мартынова, 2010).



Все перечисленные процессы способствовали формированию пространственно-временной неоднородности почвенного покрова Прибайкалья, в т.ч. ее плакорных, западных, эрозионных и оглеенных компонентов. На аэрокосмоснимках хорошо прослеживаются следы эрозии приводораздельных территорий холмисто-увалистого рельефа, выражающиеся как в формировании промоинного склонового рельефа (рис. 1 в, г), овражно-балочной сети (рис. 1 ж, з), характерной волнистости («шагреновости») на склонах (рис. 1 з), и сетчатого рисунка микрокомплексов (рис. 1 д, е), так и в перераспределении гумусовых веществ почвы, связанным с их сносом вниз по склону талыми и дождевыми водами и процессами дефляции, что особенно характерно для пахотных земель. Неоднородность и пятнистость ПП территории связана также с распространением карстовых явлений и воронок, особенно в местах распространения карбонатных пород кембрия, лессов и лессовидных суглинков. Т.о., ПП Прибайкалья, ввиду сложной геологической истории формирования региона, широкого распространения горных систем, островов многолетней мерзлоты (особенно в долинах и впадинах), влияния сейсмических и тектонических процессов БРЗ и др. факторов, - характеризуется значительным разнообразием (рис. 2), а СПП - высокой комплексностью.

Наиболее сельскохозяйственно-освоенная территория Иркутско-Тулунского подрайона области представлена подтаежными, степными и лесостепными ландшафтами. Почвообразование здесь происходит преимущественно на лессах и на рыхлых лессовидных суглинистых карбонатных отложениях при достаточной теплообеспеченности и значительном участии травянистой растительности, пониженном увлажнении, что обуславливает формирование под лесом комплексов гумусированных серых почв в сочетании с темно-серыми, серыми метаморфическими и буроземами. Остепненные пространства заняты типичными мицеллярными, глинисто-иллювиальными, текстурно-карбонатными черноземами и черноземовидными почвами с небольшой долей солончаковатых и солонцеватых почв по долинам рек. Физико-химические свойства гумусовой толщи наиболее используемых в сельском хозяйстве почв приведены в табл. 1.

Как мы видим, почвы лесостепного Приангарья характеризуются достаточно высоким уровнем плодородия. К факторам, ограничивающим развитие сельского хозяйства относятся: резко континентальный климат, наличие многолетнемерзлых пород, расчлененность, бугристо-западный рельеф, неоднородность и комплексность ПП.

Таблица 1. Показатели физико-химических свойств в гумусовых горизонтах некоторых типов пахотных почв Лено-Ангарской лесостепи (усредненные данные /границы варьирования)

| Тип почвы по класс.2004 (1977) г. | Кол-во разрезов | Глубина, см | pH _{H2O} | Гумус, % | Ca ²⁺ , мг-экв | Mg ²⁺ , мг-экв | Физ. глина, % | CO ₂ , % |
|--|-----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|
| Серые метаморфические (дерново-карбон.) | 24 | <u>29</u> 22-38 | <u>8,5</u> 7,0-9,2 | <u>4,7</u> 2,7-9,1 | <u>31,8</u> 17,9-41,6 | <u>6,0</u> 1,4-12,1 | <u>43</u> 31-64 | <u>5,8</u> 0,6-11,2 |
| Серые метаморфические элювиальных (дерново-карб. выщ.) | 24 | <u>30</u> 13-46 | <u>7,1</u> 6,6-7,8 | <u>5,2</u> 3,3-9,5 | <u>34,3</u> 25,2-52,5 | <u>7,7</u> 2,0-15,2 | <u>44</u> 31-63 | <u>1,7</u> 0,7-2,7 |
| Серые (серые лесные) остаточнок-карбонатные | 17 | <u>30</u> 9-39 | <u>6,9</u> 6,5-7,3 | <u>4,1</u> 3,1-5,0 | <u>29,2</u> 23,2-40,0 | <u>5,9</u> 2,3-9,6 | <u>49</u> 32-62 | - |
| Черноземы текстурно-карбонатные | 12 | <u>73</u> 50-80 | <u>8,6</u> 8,0-8,9 | <u>7,2</u> 6,0-8,5 | <u>30,8</u> 25,2- | <u>11,2</u> 9,2-13,2 | <u>48</u> 46-50 | <u>2,6</u> 1,8-3,3 |



Сельское хозяйство наиболее развито в южной части области на равнинных территориях и поймах. Причем, на участках с бугристо-западинным рельефом расположено 70-80% с.-х. земель, из них 50% - это пашни. В составе пахотного (Хуснидинов, 2017) фонда наибольшее распространение имеют серые – 47,7 %, буроземы и серые метаморфические почвы (дерново-кабонатные по классификации 1977 г.) - 35,5%. На долю черноземов приходится 7,4% территории, черноземовидных – 3,2 %, аллювиальных почв пойм – 2,4 %, дерново-подзолистых – 1,9 %, темногумусово-глеевых почв лугов – 1,6%, прочих – 0,3 % от общей площади пашни.

В составе земель Иркутской области (площадь которой равна 77485 тыс. га) сельскохозяйственная освоенность земель составляет 3,6%, а земли пашен составляют 2,2 % (Лысанова, 2015). Проведенный нами анализ данных (табл. 2), полученных ФГБУ «ЦАС Иркутский» (Бутырин, 2017) показал, что в наиболее освоенном сельскохозяйственным производством Иркутско-Тулунском подрайоне Иркутской области сельхозугодьями занято всего 2387,6 тыс. га, в том числе пашней – 1611,6 тыс. га, из которых на сегодня используется в сельскохозяйственном производстве лишь 56,2 %.

Анализ структуры сельскохозяйственных земель наиболее освоенных районов Иркутско-Черемховской равнины говорит о значительных территориях пашни, неиспользуемых в настоящее время из-за проблем заболачивания, подтопления, эрозии и дефляции, зарастания кустарниками и др., что часто является следствием неоднородности почвенного покрова. Смыв почвы на пашне достигает в среднем 5-10 т/га в год (Рыжов, 2009). Бессистемная раскорчевка лесов и распашка почв, интенсивный выпас скота и несоблюдение противоэрозионных мер способствовали усилению эрозионных процессов.

Таблица 2. Структура сельхозземель Иркутско-Тулунского подрайона Иркутской области

| Регион | Пашня, всего тыс. га | Используемая пашня тыс. га | % от пах. зем. | Неиспользуемая пашня | | | | | Пашни, пригодн. для введе- ния в с/х оборот |
|-------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------------|--|
| | | | | Всего тыс. га | % от пах.зем | в том числе, тыс. га | | | |
| | | | | | | Заболоч. /подтопл | Эроди- рован. | Залесен./ закустар. | |
| Иркутская зона | 921,27 | 471,01 | 51,1 | 450,26 | 48,9 | 1,8 | 116,7 | 89,48 | 242,28 |
| Тулунская зона | 690,32 | 434,23 | 62,9 | 256,09 | 37,1 | 6,1 | 17,9 | 120,52 | 111,57 |
| Итого: | 1611,29 | 905,24 | 56,2 | 706,35 | 43,8 | 7,9 | 134,6 | 210,0 | 353,85 |

Выводы

Проведенный анализ почвенного покрова Прибайкалья позволяет заключить следующее: 1) сложная геологическая и временная история развития региона обусловила формирование почвенного разнообразия региона, пространственной неоднородности и комплексности почвенного покрова; 2) наибольший вклад в формирование структуры почвенного покрова Прибайкалья вносит рельеф и литология районов, на фоне влияния мерзлоты и климата; 3) региональные особенности почвенного покрова наиболее освоенных сельхозрайонов Иркутской области, приуроченных к Иркутской и Лено-Ангарской лесостепным зонам, во многом обусловлены широким распространением кембрийских алевролитов, лессовых и лессовидных пород, которые благодаря своему вещественному



составу и физико-химическим свойствам, карбонатности - нейтрализуют процесс оподзаливания лесных почв, создают оптимальный водно-воздушный режим и условия, благоприятные гумусонакоплению в почвах, что приводит к формированию плодородных почв – черноземов, серых и темно-серых, серых метаморфических и буроземов темных остаточно-карбонатных; 4) неоднородность и комплексность почвенного покрова, наряду с процессами эрозии, заболачивания, залесения, подкисления и др. весьма значимо (~на 50%) снижают фонд пахотных земель наиболее освоенной сельскохозяйственной зоны Прибайкалья, что предполагает необходимость разработки и внедрения научно-обоснованных методов ландшафтно-адаптивного земледелия с учетом неоднородности и региональной специфики почвенного покрова региона.

Литература

- Атлас (2009) социально-экономического развития России. Раздел «Развитие Байкальского региона»(1:5000000), ред.: Н. С. Касимов [и др.]. - М.: Произв. картосост. объединение "Картография", 2009. - 216 с. – URL: webirbis.spsl.nsc.ru/irbis64r_01/cgi/cgiirbis
- Бутырин М.В., Штанцова В.В. Динамика основных показателей плодородия пахотных почв Иркутской области // Земледелие. 2017. № 4. С. 9-14.- URL: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/4-2017>
- Воробьева Г.А. (1988) Возраст почв Прибайкалья // Естественная и антропогенная эволюция почв. – Пушино, 1988. – С. 74-82.URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/206280>
- Кузьмин В. А. (2005) Геохимия почв юга Восточной Сибири. – Иркутск: изд-во ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы, 2005. – 137 с. - URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002873517>
- Лысанова Г.И. (2015), Сороковой А.А. Потенциал земельных ресурсов регионов Сибири //География и природные ресурсы.-2015.-№2.-С.149-155.- URL: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/gipr/2015-2/149.pdf>
- Мартынова Н.А. (2010) Почвы / Атлас «Иркутск и Иркутская область». Учебно-справ. картограф. пособие, 2-ое изд.- Иркутск: ФГУП «ВостСибАГП», 2010.- С. 27.- URL: <https://pandia.ru/text/82/198/40975.php>
- Рыжов Ю.В. (2009) Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах малых рек юга Восточной Сибири // География и природные ресурсы, № 3, 2009. - С. 94-101.-URL: http://www.izdatgeo.ru/journal.php?action=output_more&id=3&id_dop=176&idsearch=4442
- Хуснидинов Ш.К. (2017), Дмитриев Н.Н., Бутырин М.В., Романчук У.И. Научно-методические основы применения удобрений и мелиорации в Прибайкалье.-Иркутск: Изд-во ИрГАУ, 2017.- 248 с.



УДК 631.436

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ В РАЗЛИЧНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕГИОНАХ АЗЕРБАЙДЖАНА

Гумматов Н.Г.

Научно-исследовательский институт земледелия, Баку, Азербайджан

ngummatov@mail.ru

GEOSTATISTICAL REGULARITIES OF SPATIAL VARIABILITY OF STRUCTURAL STATE OF SOILS IN VARIOUS AGRO-ECOLOGICAL REGIONS OF AZERBAIJAN

Hummatov N.G.

Research Institute of Crop Husbandry, Baku, Azerbaijan

Regularities of spatial variability of the structural state of soils in rainfed and irrigated regions of Azerbaijan are discussed with application of classical statistics and geostatistics. The highest coefficient of variation is observed for water-stable aggregates > 3 mm (106 %), and the lowest – for 10-0.25 mm (7.9 %). The results of geostatistical analysis show a strong spatial dependence of the indicators of wet sieving at irrigation.

Введение

Пространственная конфигурация, формы, размеров и прочности агрегатов обуславливает водный, воздушный, тепловой и питательный режимы, и соответственно, движение влаги и питательных элементов, рост и развитие корневой системы и в целом продуктивность сельскохозяйственных культур и жизнедеятельность почвенно-растительного покрова. Интенсивное использование почвы в сельском хозяйстве и систематическое применение агротехники при различных агроэкологических условиях значительно изменяют первоначальные структурно-агрегатные состояния почвы. Негативное изменение структурно-агрегатного состояния почвы обычно вызывают ограничения на рост корней, уменьшая использование влаги и питательных веществ растениями.

Начиная с 90-х г. прошлого столетия внимание агропочвоведов и агрофизиков направлено на изучение и моделирование изменчивости почвенно-физических свойств в различных пространственных масштабах с применением геостатистики (Гумматов и др., 1992; Шеин и др., 2001; Гончаров, 2010; Iqbal et al., 2005). Вероятно, увеличение интереса к изучению пространственной изменчивости связано с развитием точного земледелия. (Якушев, Якушев, 2007; Самсонова, 2008). Поэтому геостатистическая оценка и моделирование пространственной изменчивости структурно-агрегатного состояния почв в масштабе сельскохозяйственного поля имеет большое научно-практическое значение для агропочвоведения, агрофизики и земледелия.

Объекты и методы

Исследования проводились в 2016 году на территориях Джалилабадской (Д) и Тертерской (Т) зонально-опытных станциях (ЗОС) НИИ земледелия МСХ Азербайджанской Республики. Территория Д и Т, соответственно, относятся к Джалилабадскому и Мильско-Карабахскому агроэкологическим районам республики. Почвенный покров Д и Т, в основном, состоит из богарных и староорошаемых разновидностей светло-коричневых (каштановых) почв, соответственно. Исследования проводились в производственных условиях в пахотном



(0-30 см) слое почв. Опробование почвенного покрова в Д проводилось на участке площадью 4.05 га (150x270 м) по регулярной сетке с шагом 30 м, через 3 дня после уборки урожая озимой пшеницы. В Т был выбран участок, который после уборки озимой пшеницы летом прошлого года был не затронут и оставлен на следующий вегетационный сезон для выращивания озимых зерновых культур. На этом участке, также соответствующим образом проводилось опробование с шагом 30 м. Площадь почвенного контура – 4.86 га (90x540 м).

Определения и расчеты показателей структурно-агрегатного состава проводились стандартными агрофизическими методами (Вадюнина, Корчагина, 1986). Оценка статистических параметров структурно-агрегатного состава почв при 5%-ном уровне значимости получены с использованием пакета программ Minitab 14. Геостатистический анализ данных проведен с помощью пакетов программ Vesper 1.6 и Surfer 8.0. Теоретические основы геостатистики и её практическое применение достаточно отражены в научной литературе (Демьянов, Савельева, 2010; Webster, Oliver, 2007; Oliver, 2010).

Результаты и обсуждение

Статистические характеристики структурно-агрегатного состава почвы представлены в таблице 1. Результаты статистических анализов показывают, что кроме агрономически ценных агрегатов (10-0.25 мм) ($CV < 15\%$), все остальные показатели имеют среднюю ($15\% < CV < 50\%$) и сильную ($CV > 50\%$) пространственную изменчивость по значениям коэффициента вариации. Самый высокий коэффициент вариации наблюдался для водопрочных агрегатов > 3 мм (105-106%), что свидетельствуют о высокой вариабельности этого показателя в масштабе сельскохозяйственного поля.

Таблица 1. Статистические характеристики структурно-агрегатного состава почв

| Параметры | Содержание, %; размер агрегата, мм | | | | | | |
|--------------------|------------------------------------|-------|---------|-----------|--------------------|-------|-----------|
| | Сухое просеивание | | | | Мокрое просеивание | | |
| | >10 | <0.25 | 10-0.25 | K_{str} | >3 | >0.25 | $K_{АФИ}$ |
| Тертерский ЗОС | | | | | | | |
| \bar{X} | 13.5 | 17.3 | 69.1 | 2.3 | 0.9 | 25.0 | 128.7 |
| $CV(\%)$ | 62.7 | 39.6 | 7.9 | 24.1 | 104.6 | 23.3 | 51.6 |
| X_{min} | 1.2 | 4.1 | 50.7 | 1.0 | 0.1 | 14.8 | 49.7 |
| $X_{0.25}$ | 7.0 | 12.1 | 66.5 | 2.0 | 0.4 | 20.8 | 88.6 |
| X_{med} | 12.3 | 15.9 | 69.8 | 2.3 | 0.6 | 24.6 | 109.6 |
| $X_{0.75}$ | 17.6 | 22.9 | 73.1 | 2.7 | 1.1 | 27.5 | 150.0 |
| X_{max} | 42.1 | 36.9 | 79.0 | 3.7 | 6.0 | 50.5 | 429.2 |
| K_{skew} | 1.3 | 0.5 | -0.9 | 0.3 | 5.8 | 1.2 | 2.4 |
| K_{kurt} | 1.9 | -0.4 | 1.5 | 0.3 | 12.9 | 3.8 | 7.3 |
| Джалилабадский ЗОС | | | | | | | |
| \bar{X} | 20.9 | 10.2 | 68.9 | 2.4 | 0.7 | 16.4 | 146.6 |
| $CV(\%)$ | 42.2 | 30.4 | 10.3 | 34.0 | 106.4 | 40.0 | 55.8 |
| X_{min} | 4.9 | 4.3 | 53.4 | 1.1 | 0.0 | 4.6 | 32.0 |
| $X_{0.25}$ | 12.8 | 7.8 | 64.0 | 1.8 | 0.2 | 10.9 | 73.2 |
| X_{med} | 21.3 | 9.8 | 69.0 | 2.2 | 0.4 | 16.1 | 131.0 |
| $X_{0.75}$ | 28.0 | 12.4 | 74.6 | 2.9 | 0.9 | 21.2 | 205.2 |
| X_{max} | 38.1 | 21.7 | 81.1 | 4.3 | 3.5 | 32.8 | 352.4 |
| K_{skew} | 0.1 | 1.1 | -0.1 | 0.6 | 1.8 | 0.4 | 0.6 |
| K_{kurt} | -1.0 | 2.0 | -0.9 | -0.6 | 3.2 | -0.4 | -0.5 |

Примечание. \bar{X} , CV , X_{min} , $X_{0.25}$, X_{med} , $X_{0.75}$, X_{max} , K_{skew} , K_{kurt} , K_{str} , $K_{АФИ}$ – среднее значение, коэффициент вариации, минимальное значение, нижние квартильные значение, медианное значение, верхние



квартильные значения, максимальное значение, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, коэффициент структурности, критерий водопрочности АФИ, соответственно.

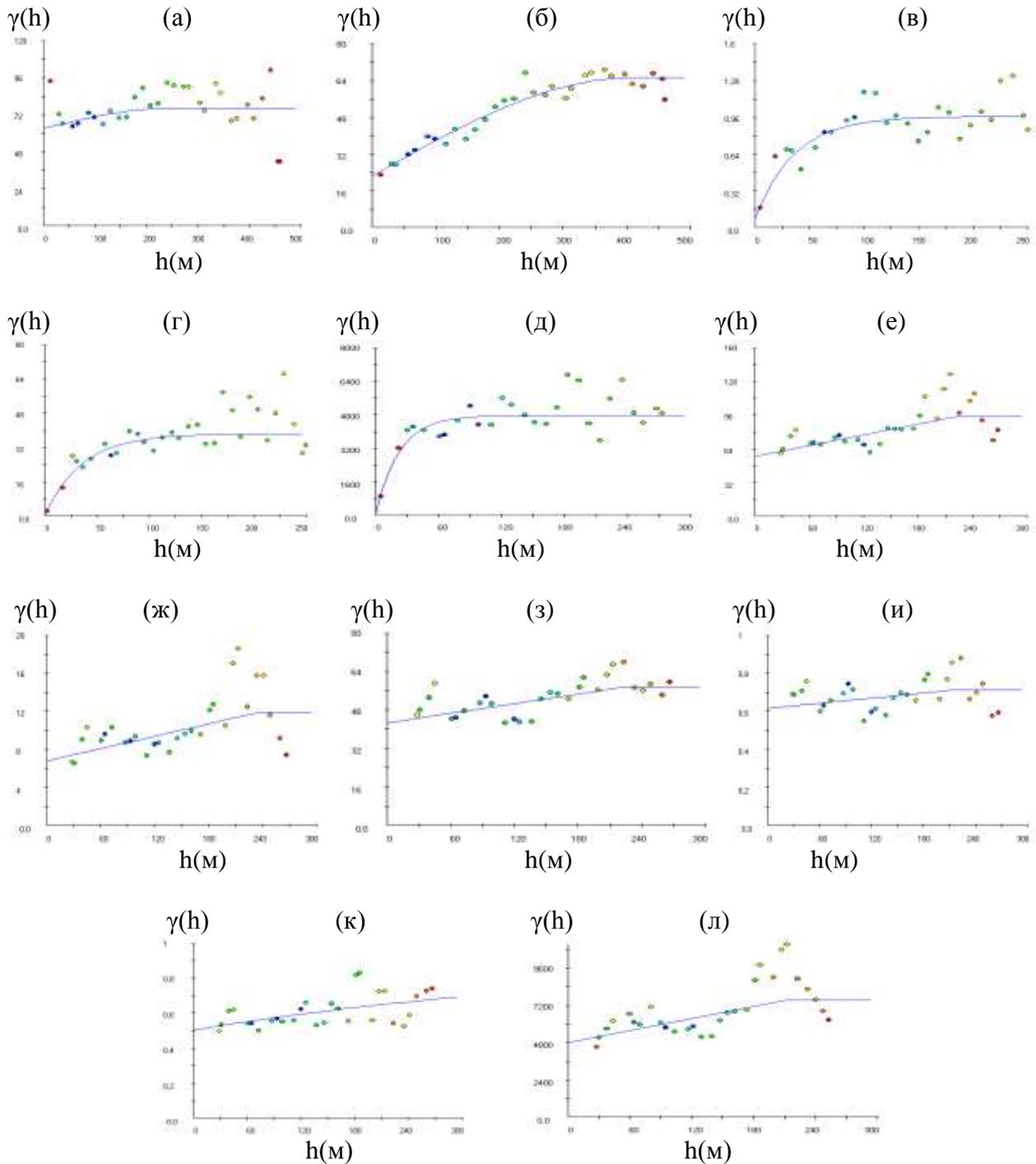


Рис. 1. Вариограммы показателей структурно-агрегатного состояния почв. Тертерский ЗОС: сухое просеивание – >10 мм, <0.25 мм (а, б), мокрое просеивание – >3 мм, >0.25 мм, $K_{АФИ}$ (в, г, д); Джаллабадский ЗОС: сухое просеивание – >10 мм, <0.25 мм, 10-0.25 мм, K_{str} (е, ж, з, и), мокрое просеивание – >3 мм, $K_{АФИ}$ (к, л).

Геостатистические методы основываются на статистической интерпретации пространственных данных и позволяют оценивать и прогнозировать значения в точках, где отборы проб не производились. Для всех исследуемых показателей проводился



геостатистический анализ, были построены экспериментальные вариограммы и аппроксимированы к их соответствующим теоретическим моделям. Экспериментальные вариограммы и параметры аппроксимации моделей представлены на рис. 1 и в таблице 2.

Вариограммный анализ структурно-агрегатного состава почвы показывает, что в различных агроэкологических условиях они соответствуют различным теоретическим моделям. Так, в орошаемых условиях структурные показатели, в основном, аппроксимируются сферическими и экспоненциальными моделями, а в богарных условиях – линейными моделями с насыщением. Некоторые показатели не имеют пространственной структуры и демонстрирует чистый наггет эффект.

Таблица 2. Параметры аппроксимации моделей вариограмм структурно-агрегатного состава почв

| Процедура | Показатель | Модель | A_0 (м) | C_0 | C_1 | $C_0/(C_0+C_1) \cdot 100$ |
|--------------------|------------|---------------|-----------|--------|--------|---------------------------|
| Тертерский ЗОС | | | | | | |
| Сухое просеив. | >10 | <i>Sph</i> | 241.9 | 63.13 | 12.97 | 82.9 |
| | <0.25 | <i>Sph</i> | 409.4 | 22.50 | 42.85 | 34.4 |
| | 10-0.25 | <i>Nugget</i> | - | 31.18 | - | 100.0 |
| | K_{str} | <i>Nugget</i> | - | 0.31 | - | 100.0 |
| Мокрое просеив. | >3 | <i>Exp</i> | 40.0 | 0.07 | 0.90 | 7.2 |
| | >0.25 | <i>Exp</i> | 35.9 | 0.50 | 37.88 | 1.3 |
| | $K_{АФИ}$ | <i>Exp</i> | 22.8 | 95.0 | 4682.2 | 2.0 |
| Джалилабадский ЗОС | | | | | | |
| Сухое просеив. | >10 | <i>Lis</i> | 221.0 | 56.83 | 37.79 | 60.1 |
| | <0.25 | <i>Lis</i> | 233.2 | 6.78 | 5.08 | 57.2 |
| | 10-0.25 | <i>Lis</i> | 223.1 | 42.56 | 14.97 | 74.0 |
| | K_{str} | <i>Lis</i> | 210.0 | 0.61 | 0.12 | 83.6 |
| Мокрое просеив. | >3 | <i>Exp</i> | 479.3 | 0.50 | 0.41 | 54.9 |
| | >0.25 | <i>Nugget</i> | - | 38.87 | - | 100.0 |
| | $K_{АФИ}$ | <i>Lis</i> | 212.4 | 4796.3 | 2733.7 | 63.7 |

Примечание. *Exp*, *Lis*, *Sph*, *Nugget* – экспоненциальная, линейная с насыщением, сферическая модель и наггет эффект, A_0 – радиус влияния, C_0 – наггет дисперсия, C_1 – пространственная (структурная) дисперсия, (C_0+C_1) – дисперсия насыщения (порог).

В целом, радиус влияния колеблется от значения 22.8 м до 479.3 м. Относительно меньшие значения (22.8-40.0 м) данного геостатистического показателя обнаруживается при мокром просеивании в орошаемых условиях. В богарных условиях, в той же процедуре просеивания этот показатель демонстрирует намного большие значения (212.4-479.4 м). Дисперсия насыщения (порог) – это значение дисперсии, которую модель вариограммы принимает в точке радиуса влияния. В целом, значения данного показателя по фракциям и коэффициентам структурно-агрегатного состава меняются в очень большом диапазоне – 0.31-7530.0. Наибольшие значения показывают $K_{АФИ}$, а наименьшие – K_{str} .

Отношение наггет дисперсии к дисперсии насыщения дает возможность оценить степень пространственной зависимости (SDG). При значении SDG 0-25 % имеет место высокая пространственная зависимость, при значении 25-75 % – средняя зависимость, при значении 75-100 % – низкая (Cambardella et al., 1994). Показатели мокрого просеивания при орошении демонстрируют сильную (1.3-7.2%), а при богаре – среднюю и низкую (54.9-100.0 %) пространственную зависимость. В обоих случаях, структурный состав почв показывает среднюю и слабые пространственную зависимости. Пространственная неоднородность



структурно-агрегатного состава является результатом динамических почвообразовательных процессов. Вероятно, это может указать на существовании разных механизмов, влияющих на пространственную неоднородность структурных показателей почв.

С использованием параметров аппроксимации моделей вариограмм проводили кригинг-интерполяцию и строили топоизоплеты показателей структурно-агрегатного состояния почв, которые учитывают пространственную скоррелированность данных.

Выводы

Исследование геостатистической закономерности пространственной изменчивости показателей структурно-агрегатного состояния почв, статистическая оценка компонентов этой изменчивости и выявление параметров моделей изменчивости дает возможность картировать и получать точную информацию о структурном состоянии почвенного покрова территории.

Вариограммы показателей структурно-агрегатного состояния пахотных почв в орошаемых и богарных условиях, соответственно, аппроксимируются экспоненциальной, сферической и линейной моделью с насыщением. Степень пространственной зависимости показателей водопропускности агрегатов при орошении сильнее, чем в богаре. В обоих условиях, показатели механически прочных агрегатов проявляет среднюю и слабую степень пространственной зависимости.

Литература

- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 416 с.
- Гончаров В.М. (2010) Агрофизическая характеристика почв в комплексном почвенном покрове. *Автореф. дисс. ... док. биол. наук.* М., 44 с.
- Гумматов Н.Г., Жиромский С.В., Мироненко Е.В. и др. (1992) Геостатистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы. *Почвоведение* **6**, 52-62.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. (2010) Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 327 с.
- Самсонова В.П. (2008) Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. Изд-во ЛКИ, 160 с.
- Шейн Е.В., Иванов А.Л., Бутылкина М.А. и др. (2001) Пространственно-временная изменчивость агрофизических свойств комплекса серых лесных почв в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования. *Почвоведение* **5**, 578-585.
- Якушев В.П., Якушев В.В. (2007) Информационное обеспечение точного земледелия. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 382 с.
- Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M. et al. (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **58**, 1501-1511.
- Iqbal J., Thomasson J.A., Jenkins J.N. et al. (2005) Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **69**, 1338-1350.
- Oliver M.A. (2010) Geostatistical applications for precision agriculture. Dordrecht: Springer, 330 p.
- Webster R., Oliver M.A. (2007) Geostatistics for environmental scientists. Chichester: John Wiley & Sons, 315 p.



УДК 551.991.435

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЛАНДШАФТОВ ГОБУСТАНА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Каграманова Т.М.

Бакинский Государственный Университет, Азербайджан

tahira.gahramanova@gmail.com

Gahramanova T.M.

Baku State University, Azerbaijan

Annotation: In assessing the geoecological tension of landscapes, the methodology of estimating the ecogeomorphological tension by morphometric parameters was used. Areal of twenty landscape subtypes were identified according to their degree of suitability in agriculture. They have been grouped into five categories according to their relief properties, vegetation and soil cover.

Введение.

Рельеф является одним из ведущих компонентов ландшафта разного регионального и типологического рангов и определяет пространственно-динамическую дифференциацию экологических комплексов, их свойств и состояний [1]. Основные свойства рельефа, влияющие на экологические условия ландшафтов, приняты за критерии оценки: гипсометрия, экспозиция и уклон поверхности склонов и степени расчленения (вертикальное и горизонтальное или пространственное). Гипсометрия рельефа на экологическую обстановку влияет через климатические условия формирования ландшафтов. Расчленение же указывает на степень пространственной дифференциации ландшафтов через экогеоморфологические условия - разнообразие экологических условий обуславливает формирование систем склонов противоположных экспозиций. Экспозиция же склонов относительно солнечной радиации и воздушных масс, разных режимов температуры и увлажнения на эколого-геоморфологические условия влияет соотношением тепла и влаги не только на мега-, макро-, мезо, но и на микро- и нано склонах. Уклон поверхности – это наиболее эффективный и результативный фактор, он определяет энергию рельефа и динамику развития эрозионных процессов и склонов вообще. Количественные значения уклона служат диагностическими признаками, критерием при оценке экологических ситуаций. Они определяют количество поступающей солнечной радиации, влияют на количество инфильтрации атмосферных осадков. Наклон поверхности рельефа влияет на физико-химические свойства почвенного покрова, развитие и продуктивность растительности, его видовой состав и плотность проективного покрытия. А также, влияет на численность и видовой состав микроорганизмов и животных. В итоге, наклон поверхности оказывает влияние на превращение и перенос энергии и вещества и на степень возвращения массы вещества в кругооборот. Для выяснения роли геоморфологических факторов в формировании экологической среды и определении доли количественных показателей в системе морфометрических свойств рельефа и их выделение как критерии, участвующие в оценке экологических ситуаций в предгорной, низкогорной части Гобустана нами были проведены полевые исследования в данном регионе.



Объекты и методы

С целью оценки экологических условий ландшафтов на основе топографических карт в масштабе 1:100 000 составлены три вида морфометрических карт: по степени расчленения (пространственного или горизонтального и вертикального), экспозиции склонов и углов наклона поверхности. Значения всех морфометрических показателей приведены в единую систему исчисления. Все показатели выражены в десятибалльной системе [2]. Также, для оценки конкретных геосистем на типологическом уровне ландшафтов, использовалась ландшафтная карта 1: 500 000 (1975).

Результаты и обсуждение.

Рельеф Гобустана представляет собой чередование низкогорных хребтов и просторов равнин. В регионе исследования широко представлена сеть оврагов. Главным фактором образования аридно-денудационного, овражно-балочного рельефа наряду с климатическими условиями и рельефом, является литологический состав слагающих пород. Анализ составленных серий морфометрических карт, а также визуальное сопоставление всех выявленных ареалов по всем морфометрическим показателям в отдельности, способствовал оценке экогеоморфологической напряженности рельефа, участвующий в формировании экологической среды. При оценке геоэкологической напряженности среды, созданной геоморфологическими факторами, мы использовали методику оценки экогеоморфологической напряженности (ЭГН) по морфометрическим показателям (таблица 1) [2].

Таблица 1. Оценка ЭГН по морфометрическим показателям

| Значения морфометрических показателей | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|--|-----------|
| Углы наклона поверхности | экспозиция | | Пространственное расчленение поверх. рельефа | Баллы ЭГН |
| | По солнеч. радиации | По воздуш. потокам | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 - 1 | 0,8 | 0,8 | 0,0 – 0,5 | 1 |
| 1 - 3 | 1,6 | 1,6 | 0,5 – 1,0 | 2 |
| 3 - 5 | 2,4 | 2,4 | 1,0 – 1,5 | 3 |
| 5 - 7 | 3,2 | 3,2 | 1,5 – 2,0 | 4 |
| 7 - 10 | 4,0 | 4,0 | 2,0 – 2,5 | 5 |
| 10 - 15 | 4,8 | 4,8 | 2,5 – 3,0 | 6 |
| 15 - 20 | 5,6 | 5,6 | 3,0 – 3,5 | 7 |
| 20 - 25 | 6,4 | 6,4 | 3,5 – 4,0 | 8 |
| 25 - 30 | 7,2 | 7,2 | 4,0 – 4,5 | 9 |
| 30 < | 8,0 | 8,0 | 4,5 – 5,0 | 10 |

В целях оценки экологической напряженности ландшафтов исследуемого региона пользуясь методом наложения на топографическую основу, были выделены двадцать ареалов подтипов ландшафтов по степени пригодности их в сельском хозяйстве. Они были сгруппированы в пять категорий. При группировке ландшафтных подтипов в категории учитывались свойства рельефа (сглаженность, крутизна склона и расчлененность поверхности), растительный и почвенный покровы (Рис.1).



Рис.1 Карта геоэкологической напряженности ландшафтов Гобустана (2017)

Оценка произведена по десятибалльной системе: II и IV подтипы – 2 балла; I, VI, VII- 4 балла; III, V, IX, X, XI, XVI, XX – 6 баллов; XII, XIII, XIV, XV, XVII, XVIII, XIX -8 баллов; VIII – 10 баллов. По присвоенным баллам, в итоге выходит, что самая высокая оценка ландшафтному подтипу соответствует самая низкая оценка степени напряженности ландшафтов.

Практически непригодные ландшафты в сельском хозяйстве это солончаки, они занимают 104 км² площади, а это всего 2% исследуемой территории (5192 км²). Категория непригодных ландшафтов (7 подтипов) в которую входят ландшафты с полынно-эфемерово́й растительностью на расчлененных склонах в разной степени и составляют 3,6% территории.

Таблица 2. Оценка геоэкологической напряженности ландшафтов

| № категории | Оценка ландшафтов по пригодности в сельском хозяйстве | Баллы напряженности | № ландшафтных ареалов |
|-------------|---|---------------------|--------------------------------------|
| 1 | Практически не пригодные | 10 | VIII |
| 2 | Непригодные | 8 | XII, XIII, XIV, XV, XVII, XVIII, XIX |
| 3 | Средне пригодные | 6 | III, V, IX, X, XI, XVI, XX |
| 4 | хорошие | 4 | I, VI, VII |
| 5 | Очень хорошие | 2 | II, IV |

К категории средне пригодные относятся ландшафты с полынной, полынно-эфемерово́й растительностью на расчлененных слабонаклонных, волнисто – холмистых, вогнутых



равнинах и впадинах (7 подтипов) и составляют 45,6% территории. К категории хорошие и очень хорошие соответственно это ландшафты с эфемеровой, полынно-эфемеровой, лугово-кустарниковой, кустарниковой и солончаковой растительностью на плоских террасах, плоских, волнисто-холмистых равнинах. Четвертая категория занимает 7,1 % территории, а пятая – 9,7%. Первая и вторая категории занимают 35,8%, и эта территория создает достаточно напряженную среду в исследуемом регионе.

Выводы

Результатом исследования являются составленные карты: геоэкологической напряженности и оценки геоэкологической напряженности ландшафтов исследуемого региона. В работе они представлены в масштабе 1:500 000.

По морфометрическим показателям на карте напряженности ландшафтов в пределах ландшафтов выделяются ареалы различной степени напряженности, соответствующие ландшафтными подтипам. На карте подтипы выделены сплошной черной линией, а ареалы напряженности, выделенные, по морфометрическим показателям рельефа показаны пунктирной линией. Каждый выделенный ареал отмечен суммарным показателем напряженности, полученный по баллам степени напряженности и баллам морфометрических показателей рельефа. В результате, используя таблицу геоэкологической оценки напряженности ландшафтов, составлена соответствующая карта. Все карты составлены в программе ArcGis 10.3.

Как видно по карте (рис.2) баллы напряженности ландшафтов возрастают или увеличиваются в направлении с юго-запада на север, северо-запад и к центру территории. Самая высокая оценка соответствует шести баллам и это соответствует XVII, XIII ландшафтными подтипам. Самый низкий показатель напряженности - три балла и этот показатель соответствует ареалу XI подтипа. В пределах одного ландшафтного подтипа встречаются ареалы с различной степенью напряженности. Например, известняковому плато с горно-светло-каштановыми карбонатными почвами и с полынной и эфемеровой растительностью в пределах ландшафтного подтипа (XVI) присвоены 9, 10, 11, 12, 13 баллов напряженности.

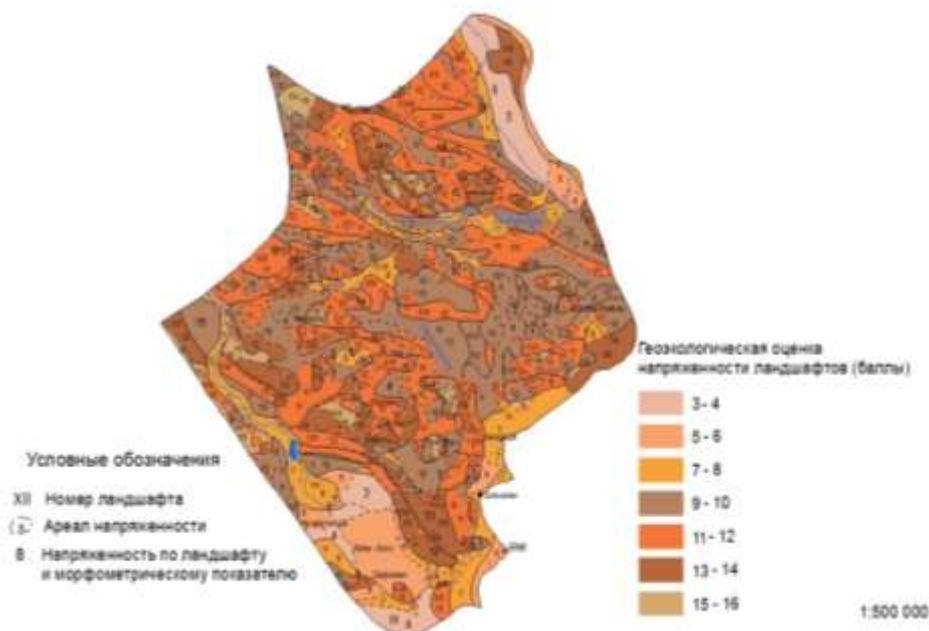


Рис.2. Карта оценки геоэкологической напряженности ландшафтов (Гобустана 2018)



Карты геоэкологической напряженности и оценки геоэкологической напряженности ландшафтов и их информация могут быть использованы для развития различных направлений сельского хозяйства.

Литература

1. Кулиев Р.Я. К методам морфометрической оценки напряженности экогеоморфологической обстановки. Вестник БГУ, № 3, серия .еств .наук, 2006, с.151-157.
2. Кулиев Р.Я. Углы наклона поверхности рельефа и оценка экогеоморфологической напряженности горных регионов Азербайджанской Республики. Вестник БГУ, №3, серия .еств. наук, 2010, с.154-159.



УДК 634.1

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА (НА ПРИМЕРЕ БРЯНСКОГО ОПОЛЯ)

Кондрашкина М.И., Кондрашкин Б.Е., Кротов Д.Г., Дядькина С.Е., Самсонова В.П.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

kondra_mar@mail.ru

VERTICAL ELECTRIC SOUNDING FOR THE STUDY OF SOIL COVER STRUCTURE (ON EXAMPLE OF THE BRYANSK OPOLE)

Kondrashkina M.I., Kondrashkin B.E., Krotov D.G., Djadkina S.E., Samsonova V.P.
Soil science faculty of MSU, Moscow, Russian Federation

Annotation: The factor analysis of the results of vertical electrical sounding allows to identify the heterogeneity of the soil cover of arable soils, due to agricultural treatments, the presence of the second humus horizon and the different quality of the parent rock. It was found that soils with the second humus horizon form compact areas confined to relief depressions.

Введение

Получение информации о состоянии почвенных угодий для целей точного земледелия требует большого числа измерений. Применение традиционных методов бывает трудоемким и требует значительного количества расходных материалов. В отличие от них, электрофизические методы позволяют за короткое время получить большой объем информации. Их несомненным достоинством является минимальная степень нарушения почвенного покрова, что позволяет проводить мониторинговые работы на одних и тех же объектах.

Особую важность приобретает использование электрофизических методов при планировании и функционировании систем точного земледелия, основной особенностью которых является строгая привязка к местности на основе GPS-технологий и неоднократное картирование свойств почв на протяжении вегетационного периода. Картирование может проводиться на основе измерения электропроводности или сопротивления, таким образом, у методов электрофизики большое будущее [1].

Удельное электрическое сопротивление почв зависит и от многих факторов, среди которых следует отметить минералогический и механический состав, пористость, влажность, температуру почв, концентрация солей в почвенных растворах [2]. Показано, что электрическое сопротивление может быть использовано в качестве вторичной информации при картировании запасов гумуса [3]. Этот факт приобретает особое значение при работе с почвами, имеющими глубокое залегание либо второй гумусовый горизонт, например при работе на агроземах разных подтипов [4]. В этих случаях часто применяется метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с помощью четырехэлектродной установки, состоящей из измерительных и питающих электродов. В неоднородной среде, которую представляют генетические горизонты с разным содержанием, например, гумуса, ВЭЗ предусматривает измерение удельного, кажущегося, электрического сопротивления до глубины 1,5-2,0 м с достаточной детальностью.



Объекты и методы

Работа была выполнена на одном из полей Брянской государственной сельскохозяйственной академии в начале июня 2006 г. Площадь поля – 16 га.

В результате проведенной мелиорации почвенный покров участка представлен комбинациями нескольких типов и подтипов почв [4]. Это агроземы темные, агроземы глинисто-иллювиальные, агротемно-серые типичные почвы и со вторым гумусовым горизонтом. В наиболее высоких местах по рельефу находятся агроземы темные, когда агротемногумусовый горизонт залегает непосредственно на горизонте С, представленным карбонатными лессами. Наиболее распространены на участке агроземы глинисто-иллювиальные, у которых сохранился в профиле горизонт В, в котором признаки иллювирувания выражены не так сильно из-за легкого механического состава и высокой пылеватости почвообразующей породы. По краям угодья, а также на некоторых участках сохранились агротемно-серые типичные почвы. В бывших понижениях наблюдались агротемно-серые со вторым гумусовым горизонтом. Второй гумусовый горизонт является самым темноокрашенным в профиле с зернисто-порошистой структурой, крупные структурные отдельности имеют ярко выраженную тенденцию к плитчатости. В соответствие с этой классификацией почвенный покров изучаемого участка нами был условно разделен на 4 класса по тому, какой горизонт находится под пахотным горизонтом: 1 класс – второй гумусовый горизонт, 2 класс – А_{Уе} или А_{ЕI}, 3 класс – горизонт В, 4 класс – горизонт С. Современный пахотный горизонт составляет 22-24 см. Таким образом, глубину прогумусированной части профиля можно считать классообразующей характеристикой.

Местоположение точек опробования фиксировалось при помощи Garmin Legend. Обработка данных проводилась при помощи пакета Statistica 7.

Результаты полевых измерений методом ВЭЗ были обработаны методом факторного анализа. Поскольку значения изменялись почти на два порядка, было проведено предварительное логарифмирование данных. Как оказалось, три фактора объясняют более 80% общей дисперсии (табл.1).

Таблица 1. Нагрузки на выделенные факторы и процент объясненной дисперсии

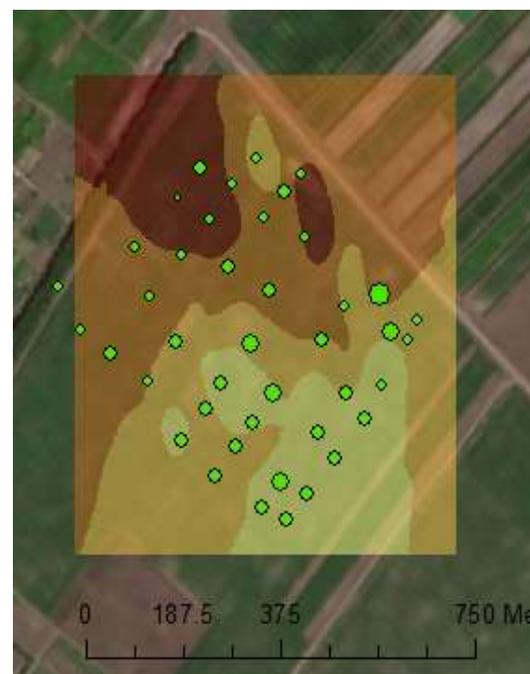
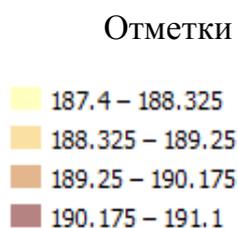
| АВ/2, см | Фактор1 | Фактор2 | Фактор3 |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| 5 | 0.858 | -0.144 | -0.011 |
| 7.5 | 0.945 | -0.021 | 0.081 |
| 11 | 0.839 | -0.067 | 0.143 |
| 15 | 0.915 | 0.113 | 0.035 |
| 2.5 | 0.752 | 0.326 | -0.026 |
| 30 | 0.893 | 0.346 | -0.012 |
| 45 | 0.438 | 0.694 | -0.112 |
| 60 | 0.643 | 0.632 | 0.000 |
| 90 | 0.085 | 0.926 | -0.119 |
| 120 | 0.055 | 0.900 | 0.207 |
| 180 | 0.455 | -0.265 | 0.725 |
| 240 | 0.086 | 0.564 | 0.750 |
| 360 | 5.364 | 3.201 | 1.188 |

| | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|--------------|
| Доля дисперсии | 0.446 | 0.267 | 0.099 | 0.813 |
|----------------|-------|-------|-------|--------------|



Поскольку глубина, на которую проходит зондирование методом ВЭЗ, пропорциональна половине расстояния между измеряющими электродами АВ [5], то первый фактор соответствует пахотному горизонту, второй – второму гумусовому горизонту, отличающемуся высоким содержанием углерода и специфической структурой, а третий, возможно, неоднородностям в толще лессовидных суглинков, располагающимся глубже 2.5 м.

Рис.1. Зависимость пространственного распределения значений фактора Z от рельефа



Заключение

Таким образом, вертикальное электрическое зондирование позволяет уточнить пространственное распределение не только верхних горизонтов, но и предсказывать неоднородность глубоких горизонтов, влияние которых, несомненно, сказалось на современном облике серых лесных почв.

Полевые измерения методом ВЭЗ выполнены в 2006 г. под руководством и с участием А.И. Позднякова

Литература

1. Поздняков А.И., Позднякова А.Д., Ковалев Н.Г. Электрофизика в почвоведении, мелиорации и земледелии. «Чудо» Тверь, 2002, 280 с.
2. Кондрашкин Б.Е., Поздняков А.И., Самсонова В.П., Кондрашкина М.И. Оценка зависимости удельного электрического сопротивления от базисных свойств агросерых почв брянского ополья. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2011. № 2. С. 36-39.
3. Simbahan Gregorio C., Dobermann Achim. Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping. //Geoderma, Aug2006, Vol. 133 Issue 3/4. - P. 345-362 (18)
4. Классификация и диагностика почв России. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Ойумена. 2004. 342 с.
5. Вертикальное электрическое зондирование. Практикум курса «Основы геофизических методов» для студентов геологических специальностей. Методическое пособие. Москва. 2007. 30 с.



УДК 631.431.1:631.445.12

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ЕЕ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ЗОЛЬНОСТЬЮ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ О. САХАЛИН

Липатов Д.Н.¹, Щеглов А.И.¹, Манахов Д.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
dlip@soil.msu.ru

THE SPATIAL DISTRIBUTION OF DENSITY AND ITS RELATIONSHIP TO ASH CONTENT IN PEAT SOILS
OF SAKHALIN ISLAND

Lipatov D. N.¹, Shcheglov A. I.¹, Manakhov D. V.¹

¹Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow, Russian Federation

Annotation: Features of profile distribution and spatial variability of the density in different types of peat and peat-gley soils are investigated. Regression equations describing the relationship between density and ash content in peat horizons are proposed.

Введение

На о. Сахалин около 7.5 % территории занимают болота, и еще 10–15 % – заболоченные леса. Для торфа характерна структурная неоднородность и анизотропность. Торфяные горизонты почв гетерогенны по своим свойствам даже в пределах одного болотного биогеоценоза в вертикальном и латеральном направлениях. Актуальной задачей является изучение профильного распределения и пространственного варьирования свойств в почвах отдельных болотных угодий, что важно для определения их структурной организации и экологических функций.

Торфяные почвы характеризуются высокими запасами органического углерода. Для расчета запасов углерода в органогенных горизонтах необходимо определение их объемного веса (плотности) и зольности. Вместе с тем, плотность подстилочных и торфяных горизонтов оценивается крайне редко, тогда как их зольность анализируется во многих исследованиях. Изучение взаимосвязи между плотностью и зольностью торфяных горизонтов является важной практической задачей.

Объекты и методы

Исследования проводились в 2012 году в болотных угодьях и заболоченных лесах на междуречье рек Ватунг и Оркуньи в северо-восточной части о. Сахалин. На территории площадью 1 км² были выбраны 4 площадки 50×50 метров, на каждой из которых был заложен почвенный разрез, а также проводился площадной пробоотбор в 25 точках по равномерной схеме опробования с шагом 10×10 м. В разрезах выполнялось морфологическое описание и отбор проб из почвенных горизонтов. На площадках в каждой точке отбирали образцы из двух верхних горизонтов: подстилочного и нижележащего торфяного до глубины 25 см. Мощность подстилки измерялась. Монолиты подстилки вырезали с площади 20×20 см, пробоотбор в торфяных горизонтах проводили буром с режущей кромкой диаметром 8,4 см. В лабораторных условиях отобранные монолиты и буровые образцы высушивали при температуре 105 °С и взвешивали для определения запасов подстилки и плотности горизонтов. В контрольных точках на площадке № 4 запас и плотность горизонта О не измерялись. Зольность в образцах анализировали с помощью озоления навесок в муфельной печи и прокаливания зольного остатка при температуре 540°С.



Результаты и обсуждение

На исследованной территории преобладают олиготрофные болота и заболоченные лиственничные леса. На площадке № 1, расположенной в центральной части болотного угодья, под пушицево-кустарничково-сфагновой растительной ассоциацией выявлена торфяная олиготрофная среднемощная почва (Dystric Fibric Histosol) следующего строения: O(0-7 см)–TO1(7-23)–TO2(23-40)–TO3(40-73)–TO4(73-110). Самый верхний слой соответствует подстилочному горизонту O, который состоит из очеса живых и отмерших растительных остатков, корней мхов и кустарничков. В сходных природных условиях на площадке № 3 выявлена пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва (Dystric Histic Gleysol), сформировавшаяся в результате пожаров, проходивших на этом болотном угодье 30–50 лет назад. Вследствие выгорания торфа органогенная толща этой почвы значительно укорочена, и профиль имеет следующее строение: Opir(0-8)–TOpir(8-28)–G1hi,pir(28-40)–G2hi(40-58)–G3f(58-75)–G4(75-95)–CG(95-105). На площадке № 2 в заболоченном лиственничнике зафиксирована торфяная олиготрофная глеевая остаточо-эутрофная иловато-торфяная почва (Dystric Hemic Histosol), ее профиль имел следующее строение: O(0-6)–TO1(6-26)–TO2te,mr(26-49)–G1hi(49-65)–G2(65-82)–CG(82-120). Выявленный на площадке № 4 в заболоченном лиственничнике профиль торфяно-глеезема потечно-гумусового иловато-торфяного ожелезненного (Dystric Histic Gleysol) имел следующее строение: O(0-7)–Tmr(7-15)–G1hi(15-31)–G2hi,f(31-43)–G3f(43-64)–G4(64-91)–CG(91-110). Степень разложения торфа во всех исследованных почвах увеличивается вниз по почвенным профилям, и на границе с минеральной толщей торфяные горизонты характеризуются сильной степенью разложения. Под торфяной толщей в верхнем минеральном слое зафиксирован глеевый потечно-гумусовый горизонт G1hi, характеризовавшийся прокраской органическим веществом и тяжелосуглинистым гранулометрическим составом. Нижние глеевые горизонты исследованных почв относятся к легкоглинистым.

Для торфяной олиготрофной почвы отмечено постепенное увеличение плотности вниз по почвенному профилю: от 0.16 в горизонте TO1 до 0.28 г/см³ в TO4, которое связано с нарастанием степени разложения торфа. Отмечены очень низкие значения зольности в горизонтах TO1–TO4, составившие 2.1–2.5%, при этом зольность подстилки в несколько раз больше, чем нижележащих торфяных горизонтов (табл. 1).

В торфяной олиготрофной глеевой остаточо-эутрофной почве плотность верхних горизонтов сходна с отмеченными значениями для торфяной олиготрофной почвы. При этом зольность в горизонте TO2te,mr увеличивается, что связано с его остаточо-эутрофным характером. В торфяных залежах Северо-Сахалинской низменности нередко отмечаются явления обращенности и вторичной минерализации олиготрофных сфагновых торфов, связанные с влиянием малых рек и ручьев, пересекающих болота. Вследствие этого ранее накопившиеся слои олиготрофного торфа могут увеличивать свою зольность при их длительном промачивании поверхностными водами, а также за счет примеси ила.

В профиле пирогенной торфяной глеевой почвы зафиксировано увеличение зольности горизонта TOpir, сформированное в результате сгорания торфа, очеса и растений. Вместе с тем плотность этого горизонта остается достаточно низкой. В профиле торфяно-глеезема зафиксировано увеличение зольности и плотности горизонта Tmr вследствие примеси минерального материала. В глеевом потечно-гумусовом горизонте отмечается резкое увеличение плотности до 0.70–0.85 г/см³, и эта тенденция продолжается в нижних глеевых горизонтах (табл. 1).



Таблица 1. Плотность и зольность органогенных горизонтов в профилях исследованных почв

| Номер площадки | Тип почвы | Горизонт | Глубина (см) | Плотность (г/см ³) | Зольность (%) |
|----------------|--|----------|--------------|--------------------------------|---------------|
| 1 | Торфяная олиготрофная среднemoshная почва | O | 0–7 | 0.08 | 7.3 |
| | | TO1 | 7–23 | 0.16 | 2.4 |
| | | TO2 | 23–40 | 0.21 | 2.2 |
| | | TO3 | 40–73 | 0.24 | 2.1 |
| | | TO4 | 73–110 | 0.28 | 2.5 |
| 2 | Торфяная олиготрофная глеевая остаточнo-эутрофная иловато-торфяная | O | 0–6 | 0.06 | 16.3 |
| | | TO1 | 6–26 | 0.12 | 6.8 |
| | | TO2te,mr | 26–49 | 0.21 | 18.6 |
| | | G1hi | 49–65 | 0.82 | |
| | | G2 | 65–82 | 1.25 | |
| | | CG | 82–120 | 1.36 | |
| 3 | Пирогенная торфяная олиготрофная глеевая почва | Opir | 0–8 | 0.05 | 6.9 |
| | | TOpir | 8–28 | 0.18 | 14.3 |
| | | G1hi,pir | 28–40 | 0.73 | |
| | | G2hi | 40–58 | 1.16 | |
| | | G3f | 58–75 | 1.12 | |
| | | G4 | 75–95 | 1.16 | |
| | | CG | 95–105 | 1.21 | |
| 4 | Торфяно-глеезем потечно-гумусовый иловато-торфяный ожелезненный | O | 0–7 | 0.06 | 14.2 |
| | | Tmr | 7–15 | 0.32 | 35.3 |
| | | G1hi | 15–31 | 0.71 | |
| | | G2hi,f | 31–43 | 0.83 | |
| | | G3f | 43–64 | 0.98 | |
| | | G4 | 64–91 | 1.18 | |
| | | CG | 91–110 | 1.31 | |

Для оценки пространственного распределения вычислялись статистические показатели варьирования плотности и зольности, зафиксированные в верхних горизонтах почв на исследованных площадках (табл. 2). Пространственное распределение плотности в большинстве исследованных органогенных горизонтов удовлетворяло нормальному закону, проверка проводилась с помощью критерия Уилка-Шапиро (при уровне значимости 0.05). Плотность горизонта O варьировала в диапазоне 0.01–0.11 г/см³. Для торфяных олиготрофных почв степень варьирования плотности меньше, чем для торфяных глеевых почв и торфяно-глееземов, для которых полученные коэффициенты вариации в несколько раз выше, чем для зональных почв (подзолов, бурых лесных).

Пространственное распределение зольности в верхних горизонтах характеризуется коэффициентами вариации от 14 до 141% (табл. 2). В горизонте O торфяной олиготрофной почвы и горизонте TO1 торфяной глеевой отмечен логнормальный закон распределения зольности. В горизонтах TOpir и Tmr распределение зольности проявляет двумодальность, при этом моды в области высоких значений соответствуют торфу с прослоями углей и



минеральной массы. Варьирование зольности в подстилке связано с изменениями состава растительных остатков в различных биогеоценотических условиях олиготрофных и мезотрофных болот, а в торфяных горизонтах – с неоднородностью процессов торфонакопления, локальными пирогенными явлениями, процессами вторичной минерализации торфов.

Таблица 2. Статистические показатели пространственного варьирования плотности и зольности в верхних горизонтах исследованных почв

| Статистические показатели | Мощность, см | Запас, кг/м ² | Плотность, г/см ³ | Зольность, % | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Площадка № 1 (n=25) | | | | | | |
| | Гор. O | O | O | TO1 | O | TO1 |
| Среднее | 9.5 | 5.98 | 0.07 | 0.13 | 8.8 | 4.4 |
| Минимум | 5.6 | 2.70 | 0.02 | 0.09 | 2.5 | 2.9 |
| Максимум | 25.0 | 15.19 | 0.10 | 0.19 | 25.4 | 7.7 |
| Коэффициент вариации, % | 44.3 | 43.3 | 28.9 | 21.0 | 52.1 | 23.0 |
| Площадка № 2 (n=25) | | | | | | |
| | Гор. O | O | O | TO1 | O | TO1 |
| Среднее | 6.3 | 3.26 | 0.05 | 0.20 | 8.6 | 29.1 |
| Минимум | 3.7 | 1.37 | 0.03 | 0.04 | 3.9 | 5.5 |
| Максимум | 9.0 | 6.90 | 0.09 | 0.53 | 34.8 | 79.4 |
| Коэффициент вариации, % | 20.4 | 47.1 | 31.1 | 74.0 | 77.4 | 95.5 |
| Площадка № 3 (n=25) | | | | | | |
| | Гор. O _{pir} | O _{pir} | O _{pir} | TO _{pir} | O _{pir} | TO _{pir} |
| Среднее | 8.7 | 4.17 | 0.05 | 0.34 | 7.0 | 23.7 |
| Минимум | 2.0 | 0.82 | 0.01 | 0.09 | 3.9 | 3.1 |
| Максимум | 17.3 | 9.13 | 0.11 | 1.11 | 22.7 | 91.4 |
| Коэффициент вариации, % | 47.6 | 53.3 | 46.1 | 94.3 | 51.5 | 140.8 |
| Площадка № 4 (n=25) | | | | | | |
| | Гор. O | O | O | T _{mr} | O | T _{mr} |
| Среднее | 6.3 | | | 0.34 | 7.1 | 51.3 |
| Минимум | 3.5 | | | 0.07 | 4.8 | 6.4 |
| Максимум | 12.0 | | | 0.85 | 8.8 | 86.5 |
| Коэффициент вариации, % | 33.7 | | | 58.4 | 13.5 | 57.0 |

Для изучения взаимосвязи между плотностью и зольностью в верхних органомгнетных горизонтах проводился корреляционный и регрессионный анализ. Рассчитывались коэффициенты корреляции Спирмена. Положительная корреляция зольности и плотности зафиксирована не для всех торфяных горизонтов болотных почв. Эта связь не была выражена в торфяных олиготрофных среднемощных почвах, но четко проявилась в горизонтах TO1, TO_{pir}, T_{mr} с зольностью более 10%, коэффициенты корреляции составили +0.82, +0.83 и +0.94, соответственно.

При проведении регрессионного анализа для выборок с логнормальным распределением зольности в расчет не включались 1–2 точки с самыми высокими значениями. Построены уравнения экспоненциальной регрессии, отражающие зависимость плотности (D) торфяных горизонтов от их зольности (A):

$$D(\text{г/см}^3) = 0.085 \cdot \exp(0.021 \cdot A(\%)) \quad (R^2 = 0.92) \quad \text{– для горизонта TO1 на площадке 2;}$$

$$D(\text{г/см}^3) = 0.090 \cdot \exp(0.020 \cdot A(\%)) \quad (R^2 = 0.93) \quad \text{– для горизонта Tmr на площадке 4.}$$



Полученные уравнения показывают, что характер увеличения плотности от 0.1 до 0.6 г/см³ в диапазоне зольности 10–85% для этих горизонтов в торфяной глеевой почве и торфяно-глееземе достаточно сходный (рис. 1).

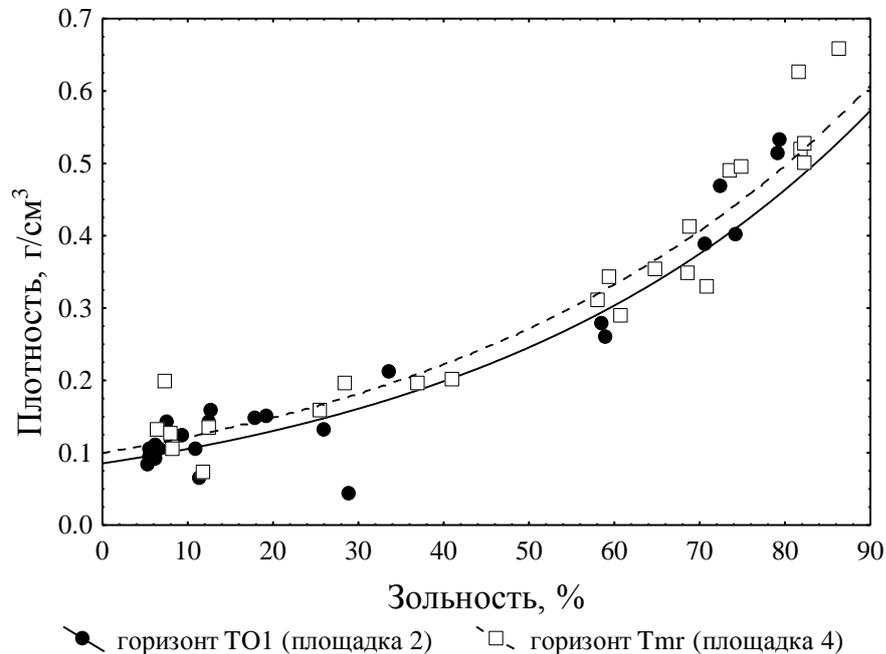


Рис. 1. Экспоненциальная регрессионная зависимость между зольностью и плотностью торфяных горизонтов TO1 (площадка 2) и Tmr (площадка 4).

С помощью построенных регрессионных уравнений можно определять плотность и массу торфяных горизонтов на основе результатов анализа зольности, что необходимо для оценки запасов органического углерода в этих почвах. Выявленные особенности пространственного распределения плотности и зольности обусловлены закономерностями процессов торфообразования в различных типах торфяных почв и торфяно-глееземов.

Выводы

1. Плотность торфяных горизонтов увеличивается в ряду: O < TO1 < TO_{orig} < TO2 < TO_{te,mr} < TO3 < TO4 < Tmr. Пространственное распределение плотности в верхних горизонтах торфяных почв в большинстве случаев удовлетворяло нормальному закону, но полученные коэффициенты вариации выше, чем для зональных типов почв.

2. Зольность верхних горизонтов торфяных почв увеличивается в ряду: TO3 < TO2 < TO1 < TO4 < O < TO_{orig} < TO_{te,mr} < Tmr. Пространственное распределение зольности в верхних горизонтах торфяных почв не всегда удовлетворяло нормальному закону, проявляя логнормальность и дву-modalность.

3. Плотность торфяных горизонтов в диапазоне 0.1–0.6 г/см³ проявляет экспоненциальную регрессионную зависимость от зольности в диапазоне 10–85%.



УДК 502.521 (470.311)

ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Мазиров М.А., Матюк Н.С, Полин В.Д.

РГАУ-МСХА им К.А. Тимирязева г. Москва, Россия

mazirov@mail.ru

Annotation: On the basis of the bioenergy method of assessing the state of various agroecosystems, a change in the direction of anthropogenic energy flows in them is established and the share of various natural and anthropogenic factors in the formation of the total energy intensity is isolated, which allowed to develop experimentally justified norms of permissible anthropogenic load, guaranteeing the preservation of environmental sustainability of agroecosystems as a whole and its constituent elements from degradation.

Введение.

Вовлечение целинных дерново-подзолистых почв в сельскохозяйственный оборот обуславливает постепенный процесс их окультуривания, который сопровождается существенным нивелированием неоднородности свойств элементарных почвенных ареалов, изменением морфологических признаков и качественного состава вовлеченных в этот процесс почвенных горизонтов. Скорость и направленность этих процессов зависит от почвенно-климатических условий, продолжительности и интенсивности воздействия антропогенных факторов.[1]

Постановка задачи.

Исследование по оценке количественных изменений энергетических потоков прихода и отчуждения энергии, поступающей в агроэкосистемы и разных энергетических субсидий и отчуждающихся из них за счет основной и пробочной продукции возделываемых культур, минерализации гумуса, выноса биофильных элементов за пределы корнеобитаемого слоя выполнены в Длительном стационарном опыте РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, заложенном проф. Дояренко в 1912 году.

Объектами наших исследований являлись агроэкосистемы различные по вовлеченной и отчужденной энергии за 100-летний период функционирования опыта:

Деградационные – поле чистого пара с содержанием органического углерода на уровне квазиравновесного состояния, обеспеченного гранулометрическим составом (0,5-0,6 % $C_{орг}$)

Компромисные - монокультуры озимой ржи и клевера на фоне применения высоких доз минеральных органических удобрений ($N_{100}P_{150}K_{120}+20$ т/га навоза), а также многолетняя залежь с содержанием $C_{орг}$ 1,4-1,5 %;

Экстенсивные – монокультуры зерновых, технических (лен) и пропашных культур (картофель) при естественном фоне питания с содержанием $C_{орг}$ 0,8-0,9 %;

Интенсивные – севооборотные участки с биоразнообразием сельскохозяйственных растений на органоминеральном ($N_{60}P_{85}K_{70}+17,3$ т/га навоза в год) фоне питания с 1950 г. при содержании $C_{орг}$ 1,2-1,3 %;

Сверхинтенсивные – тоже сочетание с 1912 г ($C_{орг}$ 1,1-1,2 %;

Биоэнергетический подход предполагает анализ баланса вещества и энергии в определенной агроэкосистеме по следующим показателям: содержание энергии в почве с учетом интенсивности её использования в предшествующие годы (гумус, содержание элементов питания); ежегодное приращение энергии за счет пожнивно-корневых остатков,



вносимых минеральных и органических удобрений; отчуждение энергии при минерализации органического вещества, а также с основной и побочной продукцией.

В таблице показано, что как в естественных экосистемах, так и в агроэкосистемах происходит аккумуляция энергии в органическом веществе и биофильных элементах почвы, запасы которых изменяются в зависимости от положительного и отрицательного влияния антропогенных факторов. Наши исследования показали, что наибольшее количество энергии накапливается в запасах гумуса в почве, которое колеблется от 854,5 тыс. МДж/га в деградированных до 1835,4 тыс. МДж/га в сверхинтенсивных. Такая же закономерность наблюдается и в накоплении энергии в запасах биофильных элементов в пахотном слое почвы.

Потери энергии органического вещества и биофильных элементов как в естественных экосистемах, так и в агроэкосистемах имеют горизонтальное и вертикальное направление.

В южно-таёжной зоне при промывном типе водного режима вектор энергетического потока направлен в большей степени вертикально вниз. Эти потери происходят за счет разложения органического вещества и миграции элементов питания вследствие протекающих биологических, физико-химических и химических процессов, которые могут использоваться почвенной биотой для построения своего тела, а в дальнейшем и корневой системой растений. Небольшая часть (5-10%) в зависимости от гранулометрического состава почвы вымывается в грунтовые воды

Наиболее низким содержанием энергии гумуса и биофильных элементов характеризуются деградированные агроэкосистемы (1094,4 тыс. МДж/га), а наиболее высоким (1849,4 тыс. МДж/га) – сверхинтенсивные.

Технологические затраты энергии на подготовку и внесение минеральных и органических удобрений, а также их энергетический эквивалент берут из справочных материалов. Энергетический эквивалент удобрений может быть переведен на действующее вещество или физическую массу.

В наших исследованиях норма внесения минеральных удобрений составляла $N_{100}P_{150}K_{120}$ д.в., а навоза – 20 т/га. Энергетический эквивалент одного кг действующего вещества азотных удобрений составляет 86,8 МДж, фосфорных – 12,6, калийных – 8,3 и навоза при 70% влажности – 630 МДж/т. Следовательно, в интенсивные и сверхинтенсивные агроэкосистемы ежегодно поступает 8,68 тыс. МДж/га с азотными, 1,89 – с фосфорными, 1,01 – с калийными и 12,6 тыс. МДж/га – с навозом.

Пожнивно-корневые остатки значительно влияют на энергетический потенциал почвы, а их масса в наших исследованиях определялась способом использования пашни (монокультура, биоразнообразие растений) и продуктивностью агробиогенозов. В наших исследованиях максимальное поступление энергии (92,8 тыс. МДж/га) отмечали в компромиссных агроэкосистемах с замкнутым циклом круговорота органических веществ, а минимальное (3,2 тыс. МДж/га) – в деградированных.

В годовом цикле функционирования различных агроэкосистем потери энергии происходят как за счет минерализации органического вещества, так и за счет отчуждения из них с основной и побочной продукцией агрофитоценозов. В наших исследованиях ежегодные потери энергии за счет минерализации органического вещества определялись интенсивностью антропогенного воздействия на почву и были наименьшими в компромиссных агроэкосистемах с замкнутым круговоротом биофильных элементов (9,74 тыс. МДж/га). По мере усиления внешнего воздействия на агроэкосистемы они возрастали до 26-30 тыс. МДж/га в интенсивных и сверхинтенсивных, а в деградированных до 34 тыс. МДж/га



Баланс энергопотоков в различных агроэкосистемах, тыс. МДж/га

| Компоненты агроэкосистемы | Агроэкосистема | | | | |
|--|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | Компромиссные | Деградированные | Экстенсивные | Интенсивные | Сверхинтенсивные |
| <i>I. Накопленное за 102 года в запасах:</i> | | | | | |
| Гумуса | 1307,8 | 854,5 | 1292,6 | 1361,6 | 1835,4 |
| Подвижного фосфора | 7,2 | 1,6 | 2,5 | 11,2 | 11,1 |
| Обменного калия | 2,3 | 1,9 | 0,9 | 4,1 | 2,9 |
| <i>Всего</i> | 1317,3 | 858,0 | 1296,0 | 1376,9 | 1849,4 |
| <i>II. Ежегодное поступление с:</i> | | | | | |
| Удобрениями | - | - | 12,6 | 24,2 | 24,2 |
| Растительными остатками | 92,8 | 3,2 | 18,2 | 33,0 | 47,7 |
| <i>Всего</i> | 1410,1 | 861,2 | 1326,8 | 1434,1 | 1921,3 |
| <i>III. Ежегодное отчуждение с:</i> | | | | | |
| Минерализацией гумуса | 9,7 | 33,9 | 25,2 | 31,3 | 26,0 |
| Основной продукцией | - | - | 33,0 | 54,9 | 62,8 |
| Побочной продукцией | - | - | 4,7 | 13,4 | 15,1 |
| <i>Всего</i> | 9,7 | 33,9 | 62,9 | 99,6 | 103,9 |
| Энергетический баланс | <u>1400,4</u> 100 | <u>827,3</u> 58 | <u>1263,9</u> 90 | <u>1334,5</u> 95 | <u>1817,4</u> 123 |

Вторым фактором снижения энергоемкости агроэкосистем является отчуждение энергии с основной и побочной продукцией, рассчитанной по энергетическим эквивалентам. По нашим данным, максимальное отчуждение энергии с продукцией отмечается в сверхинтенсивных агроэкосистемах и составляет 77,9 тыс. МДж/га, в интенсивных оно снижается на 12,3 % и в экстенсивных – на 51,6%.

Итоговые расчеты показали, что естественные травянистые биоценозы, которым присущ более замкнутый круговорот органических веществ и замедленная скорость их разложения по совокупной энергоемкости превосходят агроэкосистемы различной интенсивности

Наибольшие потери энергии за 102-летний период (42%) отмечаются в деградированной и экстенсивной (10%) агроэкосистемах. Дополнительное поступление энергии с минеральными и органическими удобрениями повышает энергоемкость почвы интенсивно используемого агроландшафта до уровня компромиссного, а сверхинтенсивного – увеличивает её на 23%.

В общей структуре энергоемкости различных агробиогеоценозов 90-95% приходится на накопленную в предшествующие годы энергию органического вещества, 2,6-9,1% – на



энергию подвижных форм фосфора, 0,6-2,6% – обменного калия, 0,8-1,0% – на энергию ежегодно вносимых удобрений, 1,1-3,0% – на растительные остатки и 2,8-4,1% – на накопленную агрофитоценозом биомассу растений.

С усилением уровня антропогенного воздействия снижается энергетический эквивалент участия органического вещества с 91,7% в деградированных, до 84,8% в интенсивных агробиогеоценозах, при этом вырастает доля участия энергии биофильных элементов в 3,2-3,6 раза.

Выводы

1. Длительное, более 100 лет, экстенсивное использование пахотных земель снижает общую энергоемкость агроэкосистемы на 136,5 тыс. МДж/га по сравнению с системами, приближенными к естественным (75-летняя залежь). Интенсивное и сверхинтенсивное воздействие на агроландшафт технологическими приемами повышает энергоемкость агроэкосистем на 70,6 и 553,5 тыс. МДж/га соответственно, при этом доля накопленной энергии в гумусе составляет 86-88%, в запасах биофильных элементов 5-10%, антропогенных факторах 2,0% и отчуждаемой продукции 4,5-6,5%.
2. Усиление различий между величиной вложенной в агроэкосистему и отчужденной из нее энергетической субсидии за 102-летний период изменяет направленность биохимических процессов превращения органического вещества, что приводит к значительным потерям запасов гумуса, которые составляют в деградированных агроэкосистемах 23,1 т/га, экстенсивных – 3,4 т/га, а в интенсивных и сверхинтенсивных, наоборот, увеличивает их на 7,1 и 20,2 т/га соответственно по сравнению с компромиссными (приближенные к естественным) экосистемами.
- 3.

Список литературы

Matyuk, N.S. Mazirov M.A. Arefeva V.A., Polin V.D. Transformation of upper part soil profile of sod-podzolic light loamy soils under the conditions of long-term soil improvement // Eurasian Journal of Soil Science). – 2013. – №9. – P. 378-384



UDC 332.05 : 519.25 : 631.4

INFORMATION INDICATORS OF SOIL TEXTURE FOR ASSESSMENT OF SOIL EVOLUTION

Mikheeva I.V.¹

¹ISSA of SB of RAS, Novosibirsk, Russian Federation
pulya80@ngs.ru

Annotation: The concept of probabilistic determinism is proposed to overcome a problem of significant soil variability which complicates finding of adequate models of soil development. Probabilistic and information indicators as characteristics of evolution of complex systems expand borders of use of soil texture results, allowing correct comparison with other natural and artificial systems on the earth and other planets.

Introduction

Now the determinism acts in two forms: Laplace, or mechanistic, determinism which cornerstone universal laws of classical physics and the probabilistic determinism which is guided by statistical laws are. In fact a need arises as result of interaction of many randomness's what statistical laws confirm. In turn randomness's are revealed as the form of manifestation and addition of a need because universal or strictly deterministic laws in pure form do not exist. A frequency, or statistical interpretation of probability, dominating now, emphasizes the objective maintenance of a concept of probability because considers it as quantitative characteristic of stability of frequency of mass accidental events. Strictly deterministic laws give exact predictions where it is possible abstracting from the complex nature of interaction between bodies, to distract from randomness's, to simplify reality. However such simplification and a schematization are possible only when studying the simplest forms of a motion. When pass to a research of the complex systems consisting of a large number of elements which individual behaviour it is difficult to describe then address the statistical laws relying on probabilistic predictions. Thus, in the modern concept of determinism a need and a randomness are integrally combined. The classical determinism of Laplace type excessively emphasized a need role due to denial of randomness in the nature and therefore gave the distorted idea of a world picture. Recognition of independence statistical, or probabilistic, the laws displaying existence of accidental events in the world supplements a former picture of strictly deterministic world. As a result of it in a new picture of the world a need and randomness act as the interconnected and supplementing aspects.

Methodology

Researches in soil genesis, paleopedology and quantitative modelling of development of soils face significant variability of soil properties which takes place even in almost homogeneous conditions. It complicates consideration of soil evolution and finding of its adequate mathematical models and parameters. The concept of probabilistic determinism according to modern philosophy of science allows to consider variability of properties of soils as their basic property. Probabilistic distributions are structural characteristics of statistical systems, which show how separate elements of system correspond with the whole system so they characterize holistic properties which have basic nature. So quantitative modelling of soil development, as statistical system, leads to necessity of the mathematical description of probability distributions (pdf) of properties and their assessment.

“Basic diagnostic parameters” of soil processes (texture fractions contents, humus content, pH, etc.) are most important properties for modelling soil development (Kozlovsky, 1991). Soils on 70-



80 % consist of the mineral particles formed from geological breeds; therefore the granulometric structure is one of lithogenic properties of soils. It is considered to be one of the most conservative properties of soils with rather long time of native change - 10^2 - 10^4 years. The genetic aspect of development of modern soils is estimated by distinction of the contents of granulometric fractions in soil horizons which vary in space very much. The reason of these changeability is nonstationariness of processes of transport and sedimentation during humidified phases of territories and moving of particles during wind erosion (geological and anthropogenous) during the droughty periods. Moreover the regional transport of particles by air takes place in Kazakhstan and Western Siberia where our investigations were conducted. It is not exception, and not rare case. In result there was a significant variability, and the texture characteristics can differ very essentially on separate points of soil. The combination of predefiniteness and uncertainty allows applying the complex approach which is mentioned above.

In our previous researches we have overcome problems in definition of probability distributions (Mikheeva, 2001, 2005) and have gone from empirical statistical distributions to mathematical functions of pdf. Results of our researches have shown that pdf of soil properties in polypedons are described by the set of functions of distributions. Law of "wave" of pdf is proved, depending on factors and processes of the soil formation. It consists in the interconnected change of shift, dispersion and the form of distribution (Mikheeva, 2017). It explains the big variety of mathematical models of pdf and gives us a basis for the further construction of universal model. As a result we have offered to use probabilistic and information indicators for assessment of condition of soils and their changes. For condition of soil, besides pdf of soil properties the information (statistical) entropy is used. For assessment of changes of soils values of information divergence of soil properties and an increment of their entropy are used. The entered characteristics allow estimating extent of influence of soil forming factors and anthropogenic impacts on probabilistic structure of values of soil properties and its stability. The case studies have been conducted in the big territory at the south of Western Siberia.

Objects and methods

Territory of case study. Initial data and data base

Soil forming breeds of researched soils represent well sorted quaternary air sedimentation with dominance of small sand on ancient lake alluvial deposits. The structure of granulometric composition of modern soils was generated basically under rock breaking and soil formation, and receipt and carrying particles by a wind during the droughty deflationary periods. Though the ratio of granulometric fractions is the same in all investigated series of soil, but at the same time the contents of all fractions essentially and unequally varies within series. Large fractions vary in the greater degree that is connected with alluvial genesis of soil forming breeds and the deflationary periods in development of these soils (Mikheeva, Kuzmina, 2000).

We have used materials of four soil surveys (scale 1:25000) at territory of 16 thousand km² situated in the south of Western Siberia: survey of soil deflation in 1965; soil survey in 1975; and two surveys on irrigated fields in 1982 and 1989. The information on about 4 thousands full soil profiles has been analysed by methods of mathematical statistics. Information correspond to soil properties, namely: depth of horizons, pH, and the contents of humus, the contents of fractions of texture, the contents of salts, and others in separate genetic horizons or layers of soils. Data within of a subtype of soils have been grouped using soil - genetic principles before doing statistical analysis. The analysis of statistical characteristics of properties of soils and their probabilistic



distributions has been carried out within of soil series. Correctness of such grouping has been confirmed by unimodality of probabilistic distributions of investigated properties.

Statistical and mathematical procedures. Equations

For statistical identification of probability distributions we used principle, when many hypotheses about coincidence were checked with big set of theoretical functions. In each case we have chosen the only function with its parameters, which is the best approximation coordinated with set of parametric and nonparametric criteria's (Lemeshko, 1995; Mikheeva, 2001). Usage of big samples ($n = 50 \dots 600$) gives us confidence that the form of probabilistic distribution received by this statistical procedure is close to its real form.

Studying of pdf brought the idea that statistical entropy of soil properties, which is calculated from pdf, can serve as numerical convoluted characteristic of soil variability and development of soil (Mikheeva, 2004). We tested this idea on data of humus content and texture fraction content in soil profile. The value of statistical entropy, using probabilistic distribution may be calculated by the formula (1), where $f(x)$ -probability distribution function of continuous random value x , A is the set where x is defined:

$$h = - \int_A f(x) \log f(x) dx \quad (1)$$

A quantitative comparison of the pdf of soil properties at different moments provides a holistic estimation of changes in their variability. We had proposed to use mathematical value of informational divergence for convoluted holistic estimation of changes of pdf of soil properties (Mikheeva, 2010; 2011). To estimate how the pdf W_1 and W_2 of soil properties differ in different horizons, or at different moments in time or in different soil states we used the value of divergence d :

$$d = \int_{-\infty}^{+\infty} (W_1(x) - W_2(x)) \ln \left(\frac{W_1(x)}{W_2(x)} \right) dx \quad (2)$$

An information divergence d is defined by first axiom of distance, that is $d(p, q) \geq 0$ with equality if $p=q$. This divergence is symmetrical and assesses difference of probability density functions in whole of their interval of variation. Symmetry of divergence means that there are no preferences between different states of soil. As a measure of dissimilarity, divergence should satisfy some conditions. The most important property of such values is the scale-invariance.

Results and discussion

Types of probability distributions of texture fractions contents do not correspond to normal distribution as a rule. It is usually Su-Johnson distribution for clay and silt contents, distribution of the minimal value for fine sand, and - Weibull's for large sand. Their common feature is the narrow central part and asymmetry. In our opinion, narrow centers, "nucleus" of classes, are natural for evolution of natural systems. They are attractors of soil properties, representing asymptotically steady sets, which lower the entropy. And as normal distribution, possesses maximal entropy therefore it is not peculiar to the natural soil systems after evolutionary way of development. Asymmetry of distributions thus testifies orientation of the tendency of the current or finished process.

Various variants of change of pdf of the contents of granulometric fractions in soil profile are possible in connection with processes of rock breaking and soil formation. First variant is strong change of pdf, evaluated by information divergence, like differences of sand and silt fractions



contents in horizons A and B1 comparing with horizon C (Table 1). In spite of this the entropy differs not very much (Table 1). So changes of texture in processes of rock breaking take place in all loci rather homogeneously.

Table 1. Relative increment of the statistical entropy and information divergence of soil texture fractions contents in loamy sandy chestnut soil

| TEXTURE FRACTION | INDICATOR | INCREMENT OF STATISTICAL ENTROPY (%) | | | | INFORMATION DIVERGENCE | | | | | | | |
|------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|------------|----|------------------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
| | | Soil horizon | A | B1 | B2 | BC | A | | B1 | | B2 | | BC |
| | | | | | | d | dr | d | dr | d | dr | d | dr |
| Clay | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | -39 | - | | | 1.9 | -- | - | - | | | | |
| | B2 | -44 | -4 | - | | 3.4 | -- | 0.2 | -- | - | - | | |
| | BC | -28 | 8 | 12 | - | 1.3 | -- | 0.1 | 0+ | 0.6 | ++ | - | - |
| | C | -22 | 12 | 15 | 4 | 1.0 | -- | 0.2 | 0+ | 0.9 | ++ | 0.02 | 0 0 |
| Light silt | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | -6 | - | | | 0.03 | 0 0 | - | - | | | | |
| | B2 | -11 | -5 | - | | 0.6 | ++ | 0.5 | ++ | - | - | | |
| | BC | -6 | 0 | 5 | - | 1.7 | ++ | 1.5 | ++ | 0.7 | ++ | - | - |
| | C | 0 | 5 | 10 | 5 | 2.5 | ++ | 2.2 | ++ | 1.6 | ++ | 0.3 | + + |
| Medium silt | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | 0 | - | | | 0.01 | 0 0 | - | - | | | | |
| | B2 | 6 | 6 | - | | 0.5 | ++ | 0.4 | ++ | - | - | | |
| | BC | 24 | 24 | 19 | - | 2.6 | ++ | 2.5 | ++ | 1.0 | ++ | - | - |
| | C | 29 | 29 | 25 | 8 | 4.0 | ++ | 3.9 | ++ | 2.1 | ++ | 0.3 | 0 + |
| Heavy silt | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | 0 | - | | | 0.02 | 0 0 | - | - | | | | |
| | B2 | -4 | -4 | - | | 0.2 | ++ | 0.2 | ++ | - | - | | |
| | BC | 12 | 12 | 15 | - | 1.8 | ++ | 2.1 | ++ | 1.2 | ++ | - | - |
| | C | 12 | 12 | 15 | 0 | 2.6 | ++ | 3.0 | ++ | 2.0 | ++ | 0.3 | + + |
| Fine sand | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | 3 | - | | | 0.1 | 0 + | - | - | | | | |
| | B2 | 22 | 19 | - | | 0.5 | - 0 | 0.5 | - 0 | - | - | | |
| | BC | 8 | 6 | -17 | - | 2.8 | -- | 4.1 | -- | 1.9 | -- | - | - |
| | C | 5 | 3 | -21 | 3 | 6.3 | -- | 9.4 | -- | 4.6 | -- | 0.7 | -- |
| Coarse sand | A | - | | | | - | - | | | | | | |
| | B1 | 3 | - | | | 0.4 | ++ | - | - | | | | |
| | B2 | 20 | 18 | - | | 2.5 | ++ | 1.1 | 0 + | - | - | | |
| | BC | 0 | -3 | -25 | - | 1.4 | ++ | 0.3 | ++ | 1.0 | + - | - | - |
| | C | 0 | -3 | -25 | 0 | 2.4 | ++ | 0.5 | ++ | 1.2 | + - | 0.7 | + 0 |

Note. In this and text table: d – value of information divergence; dr – direction of difference, which is shown by two symbols, which reflect directions of differences, accordingly, of left (minimum) and right (maximum) boundaries of variation: - -decrease; + -increase; 0 –not change

Change of pdf of clay content in soil profile is another case. The content of clay is characterized by close values in the soil profile, thus its intervals of variation in horizons A, B1 and C are



considerably crossed, divergence is not so big. But soil development in steppes leads to a partition of profile owing to formation of illuvial horizon which is more condensed, distinguished on structure. It is reflected by distinction of pdf of the clay contents in horizons A and B1 both on shift, and on dispersion. Analysis of statistical entropy results show that in horizon B1 it is much higher than in horizon A. So illuvial process considerably raises statistical entropy of granulometric structure of soil profile. Increasing of natural variability in horizon B, in connection with illuvial soil forming process, apparently, is caused by heterogeneity of infiltration of moisture.

Interpretation of entropy parameter in natural sciences often was contacted with an extremum principle - raising value of entropy characterize change of a state of systems of various nature during their natural evolution. The corresponding principle of development has received the name of a principle of maximum entropy. For closed thermodynamic systems the entropy of their properties grows or it is constant (the second law of thermodynamics). Expansion of this principle to all universe and processes within it has led to representation about «entropy arrow». But there are many results, which confirmed more complicated behaviour of entropy in open systems. It is possible to consider h , calculated from probabilistic distributions of soil properties, as one of statistical characteristics of variability of soils. Values of entropy characterize a measure of uncertainty of the micro events consisting in distinctions of soil properties. If h is not big, it speaks that values of the researched variable are levelled, less chaotic, and if h is great - it testifies the greater chaos.

The strong deflation in twentieth century has led to reorganization of pdf of fractions of sand and silt in upper horizon, without essential shifts of pdf of clay. Statistical entropy of all fractions has increased on 6 %. As a result of long arable use there was small shift of pdf of the contents of small fractions. Statistical entropy of these fractions has decreased on 12 %, and entropy of sand fraction - on 6 %. The irrigation by lower-mineralized water has caused essential shift of pdf of the contents of fine sand and clay, thus their statistical entropy has changed on 50-70 %. Hence, granulometric composition shows stability at deflation and long use in arable land, but it is not stable at irrigation.

Conclusions

Changes of probability distributions and statistical entropy of properties of soils are used as criteria for estimation of natural and anthropogenous processes of contemporary soil evolution. Stability of soil is considered, as ability to keep properties and the structural organization within the limits of natural variability at external impacts. It is theoretically and factually shown, that steady conditions of geosystems, including granulometric composition of soil, are characterized by the minimal changes of statistical entropy by module. Probability distributions and statistical entropy of granulometric fractions in chestnut soil in Western Siberia and their changes at natural and anthropogenous influences are investigated.

References

- Kozlovsky, Ph. I. (1991). Contemporary natural and anthropogenous processes of soil evolution (Publishing: Nauka, Moscow, Russia)
- Lemeshko, B.Yu. (1995) Statistical Analysis of Univariant Observations of a Random Variable: a Program System (Publishing: Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia)
- Mikheeva I.V., Kus'mina Ye.D. (2000) Statistical Characteristics of Soil Particle-Size Composition Formula // Eurasian Soil Science 2000. -Vol.33, N 7. p. 713-723.
- Mikheeva, I.V. (2001). Statistical Probability Models of Soil Properties (with Chestnut Soils of the Kulunda Steppe as an Example) (Publishing: Rossiyskoy Akademii Nauk, Novosibirsk, Russia).



- Mikheeva, I.V. (2004). Statistical Entropy as a Criterion for Estimating Evolution and Dynamics of Top Soil. *Siberian Ecological Journal*. 3: 445-454..
- Mikheeva I.V. (2005). Spatial Fluctuations and Statistical Probability Distributions of Chestnut Soil Properties in the Kulunda Steppe // *Eurasian Soil Science*, 38(3), 278-288 (2005).
- I.V. Mikheva. (2010) Changes in the Probability Distributions of Particle Size Fractions in Chesnut Soils of the Kulunda Steppe under the Effect of Natural and Anthropogenic Factors // *Eurasian Soil Science*, 2010, No 12, pp. 1351-1361.
- Irina Mikheeva (2011) Probabilistic Indicators for Soil Status Evaluation/ Land Quality and Land Use Information in the European Union. Gergely Toth and Tamas Nemeth (Eds). Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2011. -399 pp. ISSN 1018-5593. ISBN 978-92-79-17601-2. doi: 10.2788/40725. p. 45-55.
- Mikheeva I.V.(2017). Probabilistic - statistical and information assessment of contemporary processes in natural objects on the basis of data of soil monitoring // *Vestnik SGUGiT*, 2017, Tom 22, № 4. c. 220-236.



УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПАХОТНЫХ И ИЛЛЮВИАЛЬНЫХ ГОРИЗОНТОВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЕЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И УРОЖАЙНОСТЬ КУЛЬТУР

Рагимов А.О.¹, Бубякин Р.И.², Лукин С.М.^{1,2}, Мазиров М.А.^{1,3}, Шентерова Е.М.¹

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, РФ
pifo@mail.ru

²Всероссийский институт органических удобрений - филиал ФГБНУ "Верхневолжский ФАНЦ", Владимир, РФ
vnion@vtsnet.ru

³МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, РФ
mazirov@mail.ru

THE INFLUENCE OF THE RELIEF AND THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE ACTIVITIES AND ILLYUVAL HORIZONTS OF SOD-PODZOLYY SOIL ON THE FORMATION OF ITS PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND PRODUCTIVITY OF CULTURES

Ragimov A.O.¹, Bubyakin R.I.², Lukin S.M.^{1,2}, Mazirov M.A.^{1,3}, Shenterova E.M.¹

1, Vladimir State University. named A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

2All-Russian Institute of Organic Fertilizers, Vladimir, Russian Federation

3 MSHA them. K.A. Timiryazeva, Moscow, Russian Federation

Annotation: The article presents the results of the study of water-physical properties of sod-podzolic soils formed on two-membered sediments. It has been established that the granulometric composition of water-glacial deposits and the depth of the underlying rocks of sod-podzolic soils have unsatisfactory agrophysical properties, which affects the productivity of crops.

Введение

В последние годы в сельском хозяйстве страны остро стоит проблема сохранения и повышения плодородия почв, обусловленная сокращением применения органических и минеральных удобрений, изменением структуры посевных площадей и интенсивности обработки почвы, использованием тяжеловесных сельскохозяйственных машин и орудий. При этом комплекс мероприятий по воспроизводству плодородия почв должен быть научно обоснованным, рационально и экологически безопасным, то есть адекватным составу и свойствам почв. Эта задача решается в рамках современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия, предусматривающих дифференцированное использование почвенных ресурсов, сохранение и повышение плодородия почв, обеспечение экологической устойчивости агроландшафтов.

Все большее внимание уделяется оценке водно-физических свойств почв, включающих такие показатели, как плотность и пористость почв, гранулометрический и агрегатный состав, влагоемкость и водопроницаемость, гигроскопическая влажность, влажность завядания, запас продуктивной влаги, а также физико-химическим свойствам, как кислотность, содержание гумуса, емкость катионного обмена и другие.

Водно-физические свойства почв являются одними из важнейших диагностических показателей почв. В целинных почвах водно-физические свойства почв определяются их генезисом. В почвах сельскохозяйственных угодий антропогенные факторы, включающие механическую обработку, применение органических и минеральных удобрений, пестицидов,



мелиорацию, оказывают как положительное, так и отрицательное влияние, изменяя их свойства. Без учета водно-физических свойств почв невозможно эффективное использование современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, а также эффективное проведение почвенного мониторинга.

Цель исследований: дать характеристику изменений свойств дерново-подзолистых почв Владимирской области в зависимости от их гранулометрического состава и мощности водно-ледниковых отложений, выявить связь основных показателей водно-физических и физико-химических свойств почв с содержанием в них физической глины, органического вещества, глубиной подстилания моренным суглинком.

Задачи исследований:

1. Изучить основные свойства твердой фазы дерново-подзолистых почв и влияния на них различного гранулометрического состава почв.
2. Дать оценку изменению водно-физических свойств почв в зависимости от содержания в них физической глины и мощности водно-ледниковых отложений.
3. Дать комплексную оценку окультуренности почв по показателям водно-физического и физико-химического состояния почв.
4. Оценить градацию урожайности тритикале на дерново-подзолистой почве с различным гранулометрическим составом.

Объекты и методы

Объектом исследований являлись дерново-подзолистые почвы легкого гранулометрического состава северо-восточной части Мещерской низменности. В соответствии с почвенно-географическим районированием эта территория относится к Мещерскому округу болотно-подзолистых и болотных почв Среднерусской равнины таежной зоны дерново-подзолистых почв (Владимирская область). Почвообразующие породы на территории области представлены четвертичными ледниковыми отложениями разного гранулометрического состава. Значительную площадь занимают песчано-суглинистые завалуненные моренные отложения. Наиболее распространены они в Мещерской низменности, представляющей собой слабо всхолмленную зандровую равнину, сложенную ледниковыми отложениями.

В пределах одной ландшафтной катены, представляющей собой южный склон моренного холма, были исследованы дерново-подзолистые почвы различного гранулометрического состава (от легкосуглинистых до песчаных):

1. Пашня, на водоразделе. Дерново-сильноподзолистая, глееватая, легкосуглинистая, подстилаемая моренным суглинком;
2. Пашня, вершина южного склона. Дерново-сильноподзолистая, слабogleеватая, тяжелосупесчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком;
3. Пашня, середина южного склона. Дерново- сильноподзолистая, слабogleеватая, легкосупесчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком;
4. Пашня, нижняя часть южного склона. Дерново- сильноподзолистая, песчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком, ортзандовая.

Содержание физической глины в пахотном горизонте исследованных почв колеблется от 5,6 до 23,6 %. В начале августа учитывали урожайность тритикале яровой рамочным методом.

В образцах пахотного и иллювиального горизонтов почвы определяли гранулометрический состав по Н.А. Качинскому, плотность сложения почвы по Вадюниной и Корчагиной; плотность твердой фазы почвы пикнометрическим методом. Определение полевой и гигроскопической влажности почвы проводили термовесовым методом,



максимальной гигроскопической влажности - методом А. В. Николаева, пористости - расчетным методом. Агрегатный анализ почвы и водопрочность агрегатов определяли по методу Н.И.Саввинова.

Результаты и обсуждение

Как показали исследования, изученные почвы резко отличались по гранулометрическому составу. В почвенных профилях дерново-подзолистых почв можно было выделить общие черты: отчетливое разделение по цвету, гранулометрическому составу и сложению, двучленное строение почвообразующих пород, признаки оглеения на контактах песчано-супесчаных отложений и моренного суглинка. При близком залегании суглинистой морены пахотный горизонт образуется в зоне подстилающей морены. Формирование почвенного профиля на песчаных породах происходит при увеличении мощности легкого наноса. По содержанию физической глины почва водораздела характеризуется как легкосуглинистая, при этом уже на глубине 25 см происходит смена породы на средний суглинок. Дерново-подзолистая почва верхней части склона характеризуется как тяжелосупесчаная, а нижней части склона – легкосупесчаная. При этом смена пород происходит на глубине 59 и 70 см. Почва пахотного слоя нижней части склона по гранулометрическому составу является песчаной, с содержанием физической глины 5,6 %. При этом мощность легкого флювиогляциального наноса превышает 175 см. При этом смена пород происходит на глубине 59 и 70 см(табл. 1).

Таблица 1. Содержание физической глины в пахотном и иллювиальном горизонтах дерново-подзолистых почв и глубина залегания моренного суглинка по элементам рельефа

| Элемент рельефа | Почва | Горизонт | Содержание частиц $\leq 0,01$ мм, % | Глубина залегания моренного суглинка, см |
|----------------------|---|----------|-------------------------------------|--|
| Водораздел | Дерново-сильноподзолистая, глееватая, легкосуглинистая, подстилаемая моренным суглинком | Апах | 23,6 | 25 |
| | | В (Bg) | 32,9 | |
| Верхняя часть склона | Дерново-сильноподзолистая, слабogleеватая, тяжелосупесчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком | Апах | 16,9 | 59 |
| | | В (Bg) | 32 | |
| Средняя часть склона | Дерново- сильноподзолистая, слабogleеватая, легкосупесчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком | Апах | 12,5 | 70 |
| | | В (Bg) | 32 | |
| Нижняя часть склона | Дерново- сильноподзолистая, песчаная на песке, подстилаемая моренным суглинком, ортзандовая | Апах | 5,6 | 175 |
| | | В (Bg) | 8,8 | |

Такая дифференциация почв по склону оказывает значительное влияние на свойства почв. Содержание гумуса в пахотном слое изучаемых почв колеблется от 0,88 до 1,45%, рН почвы – от 5,1 до 5,7. В элювиальных горизонтах почвы содержание физической глины составляло 5,8-7,8%, а содержание гумуса 0,22 - 0,31 %. Иллювиальные горизонты почвы характеризуются очень сильнокислой реакцией среды. Отмечается прямая зависимость содержания гумуса от содержания в почве физической глины (табл.2).



Таблица 2. Агрохимическая характеристика пахотного и иллювиального горизонтов дерново-подзолистой почвы

| Элемент рельефа | Горизонт | pH | Гумус, % | P ₂ O ₅ мг/кг | K ₂ O мг/кг |
|-----------------|----------|-----|----------|-------------------------------------|------------------------|
| 1 | Апах | 5,1 | 1,44 | 477 | 481 |
| | В (Bg) | 3,5 | 0,45 | 114 | 150 |
| 2 | Апах | 5,7 | 1,22 | 427 | 445 |
| | В (Bg) | 3,4 | 0,26 | 103 | 130 |
| 3 | Апах | 5,4 | 1,08 | 389 | 361 |
| | В (Bg) | 4,1 | 0,33 | 78 | 123 |
| 4 | Апах | 5,6 | 0,89 | 325 | 335 |
| | В (Bg) | 4,2 | 0,29 | 77 | 107 |

Исследованиями установлено, что легкосуглинистая почва водораздела характеризуется наибольшими значениями равновесной плотности. С уменьшением содержания физической глины в почве равновесная плотность снижается, однако в песчаной разновидности она опять возрастает. В иллювиальных горизонтах равновесная плотность наибольшая. В дерново-подзолистых супесчаных почвах с увеличением содержания гумуса в почве плотность твердой фазы почвы несколько снижалась, однако эти различия были в пределах ошибки опыта. Величина удельной поверхности почвы зависела от содержания в ней илстых частиц и гумуса. Наибольшей удельной поверхностью характеризуются иллювиальные горизонты почв с содержанием физической глины 32,0 -32,8% (табл. 3).

Таблица 3. Влияние гранулометрического состава на основные свойства твердой фазы почвы

| Элемент рельефа | Горизонт | Содержание частиц ≤ 0,01 мм, % | ПС, г/см ³ | ПТФ, г/см ³ | ОУПП, м ² /г |
|-----------------|----------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | Апах | 23,6 | 1,55 | 2,57 | 6100 |
| | В (Bg) | 32,9 | 1,56 | 2,65 | 8110 |
| 2 | Апах | 16,9 | 1,5 | 2,61 | 5020 |
| | В (Bg) | 32 | 1,54 | 2,63 | 8210 |
| 3 | Апах | 12,5 | 1,36 | 2,62 | 4140 |
| | В (Bg) | 32 | 1,49 | 2,67 | 7910 |
| 4 | Апах | 5,6 | 1,44 | 2,67 | 1800 |
| | В (Bg) | 8,8 | 1,42 | 2,67 | 2740 |

ПС – Плотность сложения, г/см³; ПТФ – Плотность твердой фазы, г/см³; ОУПП - Общая удельная поверхность почвы

Проведенные исследования показали значительные различия в структурно-агрегатном составе почвы пахотных и иллювиальных горизонтов. Установлено, что в пахотных горизонтах почв наибольший удельный вес приходится на фракции 1,0-3,0 и 3,0-5,0 мм, в то время, как в иллювиальных суглинистых горизонтах преобладающей фракцией является фракция более 10 мм. В песчаной почве фракционный состав пахотного и иллювиального горизонтов существенно не различался. Обобщенная оценка структурного состояния почвы приведена в таблице 4. Она показывает, что при сухом просеивании агрегатное состояние пахотных горизонтов почвы характеризуется как хорошее или удовлетворительное, в то время как подпахотные горизонты почв, за исключением песчаных, характеризуются неудовлетворительным состоянием почвенной структуры.



Для характеристики водно-физических свойств почв в лабораторных условиях определяли: содержание гигроскопической влаги, максимальную гигроскопичность, влажность завядания, диапазон доступной влаги, полную, капиллярную, наименьшую влагоемкости, коэффициенты фильтрации.

Таблица 4. Влияние длительного применения удобрений на агрегатный состав почвы

| Элемент рельефа | Горизонт | Фракции (мм) в процентах к весу воздушно-сухой почвы | | | Коэф. структурности (К) |
|-----------------|----------|--|---------|-------|-------------------------|
| | | >10 | 10-0,25 | <0,25 | |
| 1 | Апах | 34,6 | 65,6 | 5,2 | 1,66 |
| | В (Bg) | 58,3 | 38,7 | 3,3 | 0,63 |
| 2 | Апах | 29,3 | 64,6 | 6,2 | 1,84 |
| | В (Bg) | 60,2 | 35,3 | 4,4 | 0,53 |
| 3 | Апах | 37,2 | 53,7 | 9,3 | 1,17 |
| | В (Bg) | 60,9 | 33,3 | 5,5 | 0,51 |
| 4 | Апах | 11,3 | 82,4 | 6,5 | 4,63 |
| | В (Bg) | 10,3 | 88,7 | 1,2 | 7,78 |

Исследования показали, что основные показатели водно-физического состояния почв находятся в тесной зависимости от их гранулометрического состава. Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва водораздела характеризуется наибольшими значениями содержания гигроскопической влаги, капиллярной и наименьшей влагоемкости. С уменьшением содержания в почве илистых частиц происходит снижение влагоемкости почвы, особенно наименьшей, которая характеризует способность почвы удерживать влагу после выпадения осадков. Наименьшая влагоемкость песчаной почвы более, чем в 2 раза меньше, по сравнению с легкосуглинистой, и в 1,5- 1,6 раза меньше, по сравнению с супесчаной. Следствием этого является неудовлетворительная способность песчаных почв удерживать достаточное для растений количество влаги, которые периодически испытывают дефицит влаги (табл.5).

Таблица 5. Влияние длительного применения удобрений на водно-физические свойства почвы

| Элемент рельефа | Горизонт | ГВ | МГ | ПВ* | КВ | НВ | ПВ** | ДДВ | КФ | ОП | ПА _{ев} | ПА _{нв} |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----|------------------|------------------|
| 1 | Апах | 1,06 | 2,26 | 23,6 | 22,7 | 21,4 | 12,4 | 18,2 | 0,5 | 41 | 22 | 8 |
| | В (Bg) | 1,85 | 3,5 | 24,5 | 23,4 | 23,1 | 15,2 | 17,7 | 0,04 | 39 | 15 | 3,5 |
| 2 | Апах | 0,76 | 1,36 | 23,3 | 20,7 | 15,8 | 11,5 | 13,6 | 0,66 | 44 | 27 | 20,3 |
| | В (Bg) | 1,51 | 3,02 | 25,4 | 24,1 | 23,3 | 14,8 | 18,8 | 0,04 | 42 | 30 | 6 |
| 3 | Апах | 0,55 | 1,37 | 26,7 | 19,3 | 14,8 | 8,6 | 12,6 | 2,77 | 48 | 36 | 28 |
| | В (Bg) | 1,42 | 2,74 | 22,4 | 20,5 | 16,5 | 12,2 | 12,6 | 2,07 | 45 | 27 | 20,5 |
| 4 | Апах | 0,41 | 0,96 | 27,5 | 17,7 | 10,6 | 7,1 | 8,8 | 5,91 | 46 | 36 | 30,9 |
| | В (Bg) | 0,51 | 1,05 | 23,1 | 19,9 | 13,4 | 8 | 12,1 | 13,77 | 47 | 36 | 27,8 |

ГВ - Гигроскопическая влага; МГ - Максимальная гигроскопичность; ПВ* - Полная влагоемкость; КВ - Капиллярная влагоемкость; НВ - Наименьшая влагоемкость; ПВ** - Полевая влажность; ДДВ - Диапазон доступной влаги при НВ; КФ - Коэффициенты фильтрации, м/сутки; ОП - Общая порозность; ПА_{ев} - Порозность аэрации при естественной влажности; ПА_{нв} - Порозность аэрации при НВ;

Наблюдается дифференциация показателей увлажнения по профилю дерново-подзолистых почв, подстилаемых моренным суглинком. В иллювиальных горизонтах,



сформированных на суглинистой морене, показатели полной, капиллярной и наименьшей влагоемкости значительно выше, в сравнении с пахотным слоем. При дефиците осадков глубина подстилая моренным суглинком может оказывать значительное влияние на обеспечение растений влагой. Об этом же свидетельствуют показатели диапазона доступной влаги при наименьшей влагоемкости и коэффициенты фильтрации. Содержание доступной влаги в пахотном горизонте дерново-подзолистой песчаной в два раза, а в иллювиальном горизонте – в 1,5 раза ниже, по сравнению с легкосуглинистой почвой. В супесчаных разновидностях дерново-подзолистых почв содержание доступной влаги ниже на 24 – 30 %, по сравнению с легкосуглинистой. Песчаные почвы, сформированные на глубоких песках, характеризуются провальной фильтрацией. Коэффициент фильтрации влаги в пахотном горизонте песчаной почвы достигает 5,91 метра в сутки, а в иллювиальном – 13,77 метра в сутки, в то время как в легкосупесчаной - 2,07-2,77 м в сутки, в тяжелосупесчаной – 0,66 м/сутки, в легкосуглинистой – 0,50 м/сутки. Особенно неблагоприятными условиями влагопроницаемости характеризуются иллювиальные суглинистые горизонты дерново-подзолистых почв. Коэффициенты фильтрации составляют всего 0,02-0,03 м/сутки, что приводит к застою влаги и вымоканию посевов.

Расчет общей порозности и порозности аэрации при естественной влажности почвы показал, что для пахотного слоя и подпахотного песчаного горизонта она может характеризоваться как удовлетворительная, а в иллювиальных суглинистых горизонтах – неудовлетворительная. Особенно неблагоприятные водно-воздушные условия в иллювиальных горизонтах складываются при увлажнении почвы до состояния наименьшей влагоемкости. В этом случае порозность аэрации снижается до 6,0-3,5 %, в результате чего корневая система растений на дерново-подзолистой почве с близким залеганием моренного суглинка испытывает сильный дефицит кислорода. Все это приводит к тому, что при выпадении большого количества осадков на почвах с близким залеганием суглинистого водоупора наблюдается застой влаги и вымокание посевов.

Таблица 7. Урожайность тритикале по элементам рельефа на почвах различного гранулометрического состава, ц/га

| Элемент рельефа, почва | Урожайность, ц/га | Прибавка урожая | |
|---|----------------------|-----------------|-----|
| | | ц/га | % |
| 1. Микрозападина на водоразделе. Дерново-подзолистая, глееватая, легкосуглинистая, подстилая моренным суглинком | 20,5 | | |
| 2. Верхняя часть южного склона. Дерново-подзолистая, слабogleеватая, тяжелосупесчаная на песке, подстилая моренным суглинком | 26,0 | 5,5 | 27 |
| 3. Средняя часть южного склона. Дерново-сильноподзолистая, слабogleеватая, легкосупесчаная на песке, подстилая моренным суглинком | 24,9 | 4,4 | 21 |
| 4. Нижняя часть южного склона. Дерново-сильноподзолистая, песчаная на песке, подстилая моренным суглинком, ортзандовая | 17,0 | -3,5 | -17 |
| НСР _{0,95} ц/га | 2,14 | | |

Таким образом, более высоким индексом физического состояния характеризуются почвы пашни средней части склона. Песчаные почвы нижней части склона, а также



иллювиальные суглинистые горизонты пахотных почв водораздела и верхней части склона имеют неблагоприятные агрофизические свойства. С показателями физического состояния почв хорошо коррелирует урожайность тритикале, полученная на этих почвах. Наибольший урожай тритикале получен на почвах верхней и средней части склона. На водоразделе урожай тритикале снизился за счет вымокания посевов в зимний период, а на песчаной почве – в результате недостатка влаги в вегетационный период (табл.7).

Выводы

1. Водно-физические свойства дерново-подзолистых почв, сформированных на двухчленных отложениях, в значительной степени зависят от гранулометрического состава водно-ледниковых отложений и глубины залегания подстилающих пород. Отмечается тесная зависимость содержания гумуса в пахотном горизонте почв, показателей равновесной плотности, максимальной гигроскопичности и удельной поверхности почв от содержания в них физической глины.

2. Выявлено преобладание глыбистой фракции (более 10 мм) в иллювиальных суглинистых горизонтах. Структурное состояние супесчаных разновидностей дерново-подзолистых почв можно охарактеризовать как среднее. В песчаной почве фракционный состав пахотного и иллювиального горизонтов существенно не различался.

3. Отмечается сильная дифференциация показателей увлажнения по профилю дерново-подзолистых почв. В иллювиальных горизонтах, сформированных на суглинистой морене, показатели полной, капиллярной и наименьшей влагоемкости значительно выше, а коэффициенты фильтрации влаги – намного ниже, по сравнению с пахотным слоем. Песчаные почвы, сформированные на глубоких песках, характеризуются провальной фильтрацией.

4. Изученные почвы имеют неудовлетворительные агрофизические свойства. Более высоким индексом физического состояния характеризуются супесчаные почвы пашни средней части склона.

5. Отмечена тесная зависимость урожайности тритикале от водно-физических свойств дерново-подзолистых почв. Наибольшей продуктивностью характеризуются супесчаные почвы верхней и средней частей склона, где не наблюдается вымокания посевов в осенне-зимний период и сильного дефицита влаги в вегетационный период.

Литература

1. Лукин С. М. Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах: диссертация ... доктора биологических наук: 06.01.04 / Лукин Сергей Михайлович; [Место защиты: Всерос. науч.-исслед. ин-т агрохимии им. Д.Н. Прянишникова]. - Владимир, 2009. - 405 с.
2. Методы агроэкологической оценки почв Ополя: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению высшего профессионального образования 020700 "Почвоведение" / Российская акад. с.-х. наук, ГНУ Владимирский НИИСХ Россельхозакадемии; [С. И. Зинченко и др.]. - Владимир: ГНУ Владимирский НИИСХ Россельхозакадемии, 2010. - 75 с.
3. Почвы и растения / С. И. Зинченко, М. А. Мазиров, М. К. Зинченко; Российская акад. с.-х. наук, ГНУ Владимирский науч. - исслед. ин-т сельского хоз-ва Россельхозакадемии. - Москва: [ГНУ Владимирский НИИСХ Россельхозакадемии], 2008. - 282 с.



4. Рагимов А. О. Почва и человек: эколого-функциональное взаимодействие / А. О. Рагимов, Т. А. Зубкова, М. А. Мазиров. - Москва: [б. и.]; Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, 2015. - 244 с.
5. Рагимов А.О., Зубкова Т.А., Мазиров М.А. Роль почвы в жизни общества Владимирской Области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 6 (116). С. 88-94



УДК 631.4

РОЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СТЕПНЫХ ПАСТБИЩ

Русанов А.М.¹, Булгакова М.А.¹, Ануфриенко А.А.²

¹ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»

²ФГБУ ГЦАС «Оренбургский»

soilec@esoo.ru

Annotation: The role of black soil organic matter in restoring the natural vegetation of degraded steppe pastures has been investigated. It has been shown that in case of excessive pasture loads, in addition to venting of plant vegetative organs, the topsoil is compacted, which provides a kind of conservation of the humus state of chernozem, including the number of its amphiphilic properties. After the termination of pasture use of the plot, the preserved qualitative and quantitative properties of the organic matter of chernozem provide for the softening of the soil and, as a result, the restoration of the natural plant community.

Длительный период нерационального использования естественных пастбищ уральского региона привели к замене типичных степных фитоценозов с доминированием ковыля Лессинга (*Stipa lessingiana* Trin) и типчака (*Festuca valesiaca* Gaudin) малопродуктивным разнотравьем. Причин тому несколько. Это превышение численности выпасаемых животных над экологической емкостью пастбищных экосистем, стравливание скотом травянистой растительности до наступления ими периода созревания и опадания семян, несоблюдение пастбищеоборотов и др. Однако главным фактором деградации является ранний выпас животных, когда почва не достигла состояния «физической спелости». Копыта крупного рогатого скота оказывают давление на еще влажную почву с силой 4 кг/см², овцы и козы - до 2 кг/см². Такое давление сравнимо с воздействием на верхние слои почв колесного трактора, многократно осуществляемого проезд в течение дня, что, естественным образом, вызывает уплотнение гумусового горизонта черноземов до 1,3 – 1,45 г/см³. Содержание гумуса в верхнем 0-20 см слое казалась равной 4,5 – 4,7%, Водопроницаемость не превышала 66 мм/час, степень гумификации органического вещества почв – 41,8%. Отношение С_{гк}:С_{фк} составило 2,09. Коэффициент структурности равнялся 1,12. В условиях переуплотнения мочковатая корневая система злаков не может полноценно развиваться. Злаки в течение короткого срока выпадают из травостоя почти полностью и заменяются видами трав, для которых высокая плотность почв не является лимитирующим фактором для роста и развития – полынком (*Festuca valesiaca* Gaudin), полынью белой (*Artemisia absinthium*), лебедой (*Atriplex verrucifera*), рогачем (*Ceratocarpus arenarius*) и др. (Русанов, 1993).

Таким образом, некогда высокобонитетное пастбище превращается в малопродуктивные средне- и сильнообитые участки, малопригодные для выпаса.

Произошедшие в стране на рубеже веков изменения в экономическом и хозяйственном укладе коснулись и сельскохозяйственного сектора производства. Значительно сократилось поголовье выпасаемого скота, часть его перевели на стойловое содержание. Эти изменения положительным образом отразились на состоянии травостоя естественных пастбищ; за относительно короткий срок вновь доминантными видами трав стали овсяница валлийская, ковыль Лессинга и, в меньшей степени, ковыль тырса. Восстановились проективное покрытие фитоценозов и средняя высота слагающих их растений.

Причина этого явления заключается в следующем. Переуплотнение верхних слоев почв явилось причиной смены видового состава фитоценозов, но, одновременно, плотные слои оказали защитное действие на нижележащие слои чернозема, как бы законсервировав их



свойства. Гумус лишь незначительно снизил свое содержание (на 0,2 – 0,4%) и практически сохранил свои качественные признаки: степень гумификации органического вещества черноземов равнялась 40,8. Отношение $C_{гк}:C_{фк}$ - 2,16, Коэффициент структурности достиг значения 1,47. Водопроницаемость в условиях отсутствия внешнего давления и восстановления структуры соответствовала отличному уровню признака - 121 мм/час.

Помимо обеспечения растений элементами минерального питания, органическое вещество почв, и её главный компонент – гумус, выполняют другую незаменимую функцию, которая сводится к формированию комплекса физических свойств почв: водных, воздушных, механических, термических и др., обеспечивающих почвенное плодородие. Все перечисленные физические свойства связаны с почвенной структурой, способностью почв образовывать агрегаты различной размерности. В этой связи особое значение приобретают амфифильные свойства гумуса, образование и отношение между собой гидрофобных и гидрофильных его компонентов.

Гидрофобные компоненты гумусовых веществ неподвижны в профиле почв. Они накапливаются на месте гумификации органического вещества, устойчивы к факторам внешней и внутренней почвенной среды, обладают пониженной степенью гидратации, придают вязкость растворам и плохо растворимы в воде. За счет своих свойств они формируют почвенные агрегаты и структурное состояние почв (Шеин, Милановский, 2003). Гидрофильные составляющие гумуса, относительно «молодые» продукты гумификации, служат основным источником питательных веществ для роста растений. Они подвержены микробиологической и химической минерализации, растворимы в воде и прочно удерживают влагу. Степень гидрофобности органического вещества почв показывает величину отношения гидрофобных фракций гумуса к гидрофильным и является косвенным признаком способности органического вещества к структурообразованию (Милановский, 2009).

Определение амфифильных свойств исследуемых черноземов показало, что вне зависимости от степени дигрессии естественной растительности гидрофобные компоненты во всех образцах почв, преобладали над гидрофильными, что свидетельствует о сохранении органическим веществом почв способности к структурообразованию, что и получило доказательство в виде определения структурного состояния почв естественных пастбищ региона.

Литература

1. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. - 186 с.
2. Русанов А.М., Булгакова М.А. Экология естественного восстановления деградированных черноземов // Проблемы агрохимии и экологии. 2018. № 3. С. 65-69.
3. Русанов А.М. Гумусное состояние южных черноземов под естественными пастбищами // Почвоведение. 1993. №11. С. 25 – 30.
4. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61



УДК 631.4

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГУМУСА В ПОЧВАХ СКЛОНОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Смирнова Л.Г., Шаповалов А.С., Украинский П.А., Михайленко И.И., Смирнов Г.В.

ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН», г. Белгород, РФ,
lidya.smirnova@yandex.ru

Annotation: On the Chernozem soils of the southern forest-steppe of the Central Russian upland the statistical assessment of the significance of humus content and the identification of spatial patterns of its distribution in the soils of slope landscapes in the associated analysis on virgin soil and arable land. As a result of the quantitative analysis it was found that the greatest number of statistically significant differences is found in the upper layer (0 - 20 cm). At depths of 20-40 cm, 60-80 cm and 80-100 cm, the values of the sign of differences do not have. The spatial distribution of humus content shows that the territory of the slope in the layer of 0-20 cm on virgin soil is represented by obese and medium-humus soils (more than 9.0% and from 9.0 to 6.0 %), on arable land by medium-humus and small plots of soils with humus content from 3.0 to 4.5 %.

Keywords. spatial distribution of humus, slope agricultural landscapes, Chernozem soils.

Современная сельскохозяйственная освоенность ландшафтов лесостепи Среднерусской возвышенности составляет более 60 % от общей площади, поэтому распашка является одним из основных и более длительным агротехническим фактором, влияющим на почвы. Эта проблема очень актуальна для юга Среднерусской возвышенности, где широкое развитие эрозии и других процессов деградации черноземов существенно усложняет структуру почвенного покрова и требует дифференцированного применения технологий земледелия, с адаптацией их к внутривольной пестроте плодородия, агротехнических и агроэкологических свойств почв. Пространственное варьирование основных свойств почв, в пределах мезорельефа оказывает существенное влияние на эффективность использования и воспроизводства плодородия почв в эрозионных агроландшафтах. Оценка почвенной неоднородности по показателям плодородия может способствовать более точному определению уровня антропогенной нагрузки. Анализ гумусного состояния склоновых ландшафтов представляется важным и надежным критерием выявления пространственных изменений почвенного покрова.

Целью исследований является проведение количественной оценки содержания гумуса в почвах склоновых ландшафтов на пашне и в условиях целины. В процессе исследования была поставлена задача по проведению статистической оценки значимости содержания гумуса и выявлению пространственной закономерности его распределения в почвах склоновых ландшафтов в сопряженном анализе на целине и на пашне.

Исследования проводили на черноземных почвах на пологом прямом склоне юго-западной экспозиции заповедника «Ямская степь» и примыкающей к его границе пашне, которые расположены в Губкинском районе Белгородской области. Изучаемыми объектами являлись черноземные почвы, приуроченные к пространственно сопряженным угодьям: пашне и степному заповедному участку (целине). На 6 катенах было заложено 60 скважин, глубиной до 1 м. Расстояние между линиями катен 50 метров, расстояние между точками по катене также 50 м. Образцы почвы для анализа отбирались по слоям: 0-20 см, 20-40 см, 40-60 см, 60-80 см, 80-100 см. Всего было проанализировано 300 образцов. Подготовка почвы к



определению гумуса проводилась по стандартной методике. Химический анализ почвы по определению содержания гумуса по методу Тюрина проводился в соответствии с ГОСТ 2613-93.

Результаты исследований показали, что среднее содержание гумуса в метровом слое почвы на заповедном участке по катенам составляло 5,48 %. Длительное антропогенное воздействие на почвы создает дефицит поступления свежих органических остатков в почвенный профиль, что привело к значительному изменению содержания гумуса в условиях использования пашни. Средний показатель в почвах в условиях пашни составляет 4,48 % (табл. 1). Главная масса корней сосредоточена в слое 0-20 см. Среднее содержание гумуса в почвах заповедного участка составляет 9,05 %, в почвах пашни – 6,87 %. Далее по профилю наблюдается постепенное снижение показателей, однако в условиях пашни этот процесс более заметен, чем на целине.

Коэффициент вариации на этой глубине на целине составляет 9,34 %, на пашне 8,87 %. Степень варьирования невысокая. На глубине 20-40 см содержание гумуса заметно снижается. Среднее его значение в условиях целины наблюдается на уровне 6,27 %, а на пашне этот показатель составляет 5,68 %. Варьирование признака, как на целине, так и на пашне на этой глубине невысокое и находится на уровне 11,7 и 13,35 %. С глубиной отмечается заметное снижение гумуса в почвах. В слое 40-60 и 60-80 см содержание гумуса изменяется до 4,83-4,13 % на целине и до 4,26-3,19 % на пашне. Коэффициент вариации составляет от 12,05-16,89% на целине до 16,93-25,52 % на пашне. В слое 60-80 см на пашне варьирование признака увеличивается до среднего уровня и на этой глубине наблюдается резкое уменьшение содержания гумуса в почвах. Если на глубине 80-100 см содержание гумуса в почве на целинных участках составляет 3,15 %, то в условиях пашни этот показатель определяется на уровне 2,42 %, т.е. на 0,73 % меньше. При этом коэффициент вариации в целинных почвах показывает среднее варьирование (21,52 %), в почвах пашни ближе к высокому (34,04 %) (табл. 1).

Таблица 1 Количественная оценка содержания гумуса (%) в почвах склоновых ландшафтов на пашне и в условиях целины

| Слой почвы, см | Среднее содержание гумуса, % | | СКО | | КВ, % | |
|--------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| | целина | пашня | целина | пашня | целина | пашня |
| 0-20 | 9,05±0,27 | 6,87±0,19 | 0,84±0,19 | 0,61±0,13 | 9,34±2,96 | 8,87±2,80 |
| 20-40 | 6,27±0,23 | 5,68±0,24 | 0,73±0,16 | 0,75±0,17 | 11,7±3,69 | 13,35±4,22 |
| 40-60 | 4,83±0,18 | 4,26±0,23 | 0,58±0,13 | 0,72±0,16 | 12,05±3,81 | 16,93±5,28 |
| 60-80 | 4,13±0,22 | 3,19±0,25 | 0,69±0,16 | 0,79±0,18 | 16,89±5,34 | 25,52±8,07 |
| 80-100 | 3,15±0,21 | 2,42±0,25 | 0,67±0,15 | 0,81±0,18 | 21,52±5,59 | 34,04±9,19 |
| Среднее по катенам | 5,48 | 4,48 | 0,70 | 0,74 | 14,30 | 19,74 |

Пространственное распределение содержания гумуса, представленное на рисунке показывает, что территория склона в слое 0-20 см на целине представлена тучными и среднегумусными почвами, на пашне среднегумусными и лишь небольшая доля почв с содержанием гумуса от 3,0 до 4,5 % вклинивается частично в исследуемый массив (рис.).

С глубиной содержание гумуса падает и темпы падения содержания гумуса в условиях целины менее заметны, наблюдается постепенное его снижение. На каждой глубине отмечается более однородное распространение контуров с определенным содержанием



гумуса. В условиях пашни уже на глубине 60-80 см отмечаются включения контуров с содержанием гумуса менее 1,5 %.

Картограммы содержания гумуса созданы на основе интерполяции значений между точками отбора образцов почвы. Она выполнена в программе ArcGIS при помощи метода сплайна с барьерами. В качестве барьера при интерполяции взята граница заповедника.

На рисунке видно, что фактическое положение точек отбора образцов почвы имеет ряд отклонений от планировавшейся схемы отбора – регулярной прямоугольной сетки. Поэтому необходимо проверить, является ли размер этих отклонений достаточным, чтобы признать фактическую схему отбора неравномерной. В данной работе использован тест Кларка-Эванса, реализованный в программе ArcGIS как инструмент «Среднее расстояние до ближайшего соседа» (входит в набор инструментов «Пространственная статистика»).

Тест Кларка-Эванса основан на вычислении среднего расстояния до ближайшего соседа (РБС). Нулевой гипотезой для теста Кларка-Эванса является полная пространственная хаотичность, то есть случайное распределение точек.

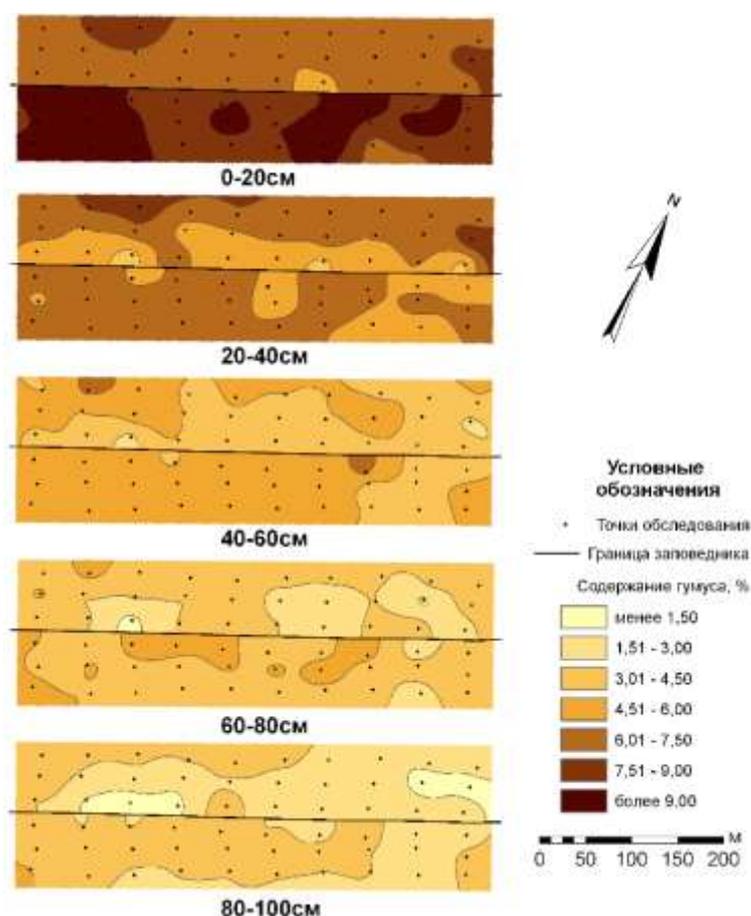


Рис. 1. Пространственное распределение гумуса в почвах исследуемой территории по глубине отбора (верхнее поле –пашня, нижнее-целина)

Альтернативной гипотезой является групповое или равномерное распределение. Фактическое РБС сопоставляется с РБС, необходимым для случайного распределения при текущей площади исследуемого участка и текущем количестве точек. Если отношение первого ко второму (R – коэффициент Кларка-Эванса) достоверно и меньше 1- то распределение групповое. Если больше 1 и достоверно - наблюдается тенденция к равномерности. Когда R равно 1 или не достоверно – объекты размещены случайным



образом. Тест был применен как ко всей совокупности точек, и отдельно к точкам в целинной степи и точкам на пашне (табл. 2).

Таблица 2. Результаты теста Кларка-Эванса

| Угодье | Фактическое РБС, м | | | | Ожидаемое среднее РБС, м | R | р-значение |
|----------------|--------------------|---------|----------|------|--------------------------|------|------------|
| | минимум | среднее | максимум | СКО | | | |
| Степь | 13,06 | 22,03 | 31,90 | 4,49 | 18,56 | 1,19 | 0,05 |
| Пашня | 20,45 | 25,29 | 31,37 | 2,91 | 18,56 | 1,36 | 0,0002 |
| Вся территория | 13,06 | 23,41 | 31,90 | 3,84 | 18,56 | 1,26 | 0,0001 |

Результаты теста Кларка-Эванса показывают, что распределение точек в пространстве можно признать равномерным. Это верно, как для всей совокупности точек, так и в отдельности для точек, расположенных в степи и на пашне. Таким образом, фактическое положение точек отбора образцов почвы удовлетворяет принципу отбора по регулярной прямоугольной сетке.

На рисунке четко видно, что содержание гумуса падает с глубиной на всей исследуемой территории. Также по площади, занимаемой ареалами с различным содержанием гумуса, можно визуальнo определить, что среднее содержание гумуса на целине выше, чем на пашне. И это верно для всех глубин. Но какие-либо закономерности пространственного распределения содержания гумуса визуальнo выявить в данном случае является затруднительным. Поэтому необходимо привлечение инструментов пространственной статистики.

Таким образом, результаты количественного анализа указывают на то, что наибольшее число статистически значимых различий обнаруживается в верхнем слое (0- 20 см). На глубинах 20-40 см, 60-80 см и 80-100 см статистически значимых отличий не имеют. Пространственное распределение содержания гумуса, показывает, что территория склона в слое 0-20 см на целине представлена тучными и среднегумусными почвами (более 9,0% и от 9,0 до 6,0 %), на пашне среднегумусными и небольшими участками почв с содержанием гумуса от 3,0 до 4,5 %.



УДК 631.58 : 631.42.05

К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОНЯТИЯ «АГРОФИЗИЧЕСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТУР» В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ТОЧНОМУ ЗЕМЛЕДЕЛИЮ

Н.Ф. Хохлов

РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, РФ,
hohlov@rgau-msha.ru

BY USING THE CONCEPT OF "AGRO-PHYSICAL TECHNOLOGICAL CIRCUIT" IN RESEARCH IN
PRECISION FARMING

N.F. Khokhlov

RSAU - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazeva, Moscow, Russia

The paper discussed the logical, conceptual and terminological aspects of the methodology of agrophysical research on precision farming. The operability of the concept and expression "Agrophysical technological contour" is shown, when obtaining distributed agrophysical information in parallel driving technologies.

Принятая на государственном уровне стратегия опережающего развития экономики на базе цифрового технологического уклада (1) диктует необходимость усиления ряда акцентов в методологии агрофизических исследований точного земледелия. С большой вероятностью можно предполагать, что в приоритетнаете на целевое финансирование окажутся немногочисленные коллективы, способные обеспечивать большими массивами распределенных агрофизических данных разработчиков робототехники, автоматизированных устройств, IoT и Smart-Farmer приложений (2). Понятно, что способность получить грант на усовершенствование или освоение интеллектуальных земледельческих технологий будет определяться комплексом объективных и субъективных факторов, в том числе умением предвосхитить потребность рынка инноваций в объективной агрофизической информации. На наш взгляд, плодотворный результат усилий методологического характера на подготовительном этапе к опережающему развитию можно получить в направлении совершенствования инновационной технологии с параллельным вождением агрегатов. К этому есть ряд доводов. Во-первых, это развивающийся компонент точного земледелия, аналоги которого в виде технологической колеи и перспективной высокотехнологичной системы «Controlled Traffic Farming» (3) имеются или вскоре появятся в ряде ведущих исследовательских организаций. Во-вторых, накопление больших массивов распределенных данных для реализации потенциала сложных алгоритмов можно выполнять привычным агрофизическим инструментарием. Вполне разумно предположить, что, к примеру, данные пенетрации будут достаточными к использованию технически совершенными машинно-тракторными агрегатами, имеющими возможность регулировать в режиме онлайн площадь контакта колеса с почвой и, соответственно, техногенного уплотнения.

Однако существует реальная опасность неполного понимания требований интеллектуальных и тем более облачных технологий к созданию массивов разноуровневой агрофизической информации. К тому же опыт участия прикладных наук в обеспечении инновационных технологий показывает, что вместе с инструментальными, организационными, и другими задачами, решения требуют «бестелесные» логико-понятийные и терминологические проблемы.



Как глубина понятий, так и адекватность терминов может оказать существенное влияние на успех участия агрофизиков в выполнении государственной программы опережающего развития в области точных технологий в земледелии. Нами замечено (4), что на основе общих понятий и обозначений базовых элементов земледелия трудно без дополнительных разъяснений рационально планировать пространственное размещение площадок и точек опробования. Это легко пояснить следующими рассуждениями. Если в стационарном полевом опыте с технологической колеей планируется изучить агрофизические свойства приема обработки почвы, к примеру, фрезерование почвы, то исследователь мыслит в соответствии с определениями понятий из словарей или стандартов. ГОСТ предлагает следующее толкование: «Фрезерование почвы – прием обработки почвы фрезой, обеспечивающий интенсивное крошение, перемешивание, рыхление обрабатываемого слоя и уничтожение сорняков» (5). Это вряд ли удовлетворительно, поскольку определение достаточно полно отражает работу рабочих органов орудия, но упускает в создаваемом образе уплотняющее воздействие ходовых систем агрегата. Если в образе нет уплотненных полос, то нет и потребности выявления техногенных пространственных структур физического состояния почвы. Исследователь «законно» формализовал плотность почвы объекта функцией нормального распределения, использовал случайный отбор проб и генерализованное описание.

Возникает вопрос, не требуются ли для исследования и толкования результата оценки агрофизического состояния реально разнородных массивов почвы дополнительные смысловые компоненты. Это представляется совершенно бесспорным и, следовательно, привычно удобные официальные земледельческие термины: «фрезерование, культивация и др.» с толкованием однородных пространственных агрофизических образов не вполне адекватны техногенной физической реальности. Заметим, что основатель отечественной агрофизики А.Г. Дояренко видел агрофизическую модель результата приема обработки почвы иначе. Это следует из его выражения «обработка двухлемешным конным лушильником». То есть для А.Г. Дояренко в число существенных признаков «ядра» мыслимого, наряду с рыхлящим почвообрабатывающим орудием, входило и уплотняющее почву тяговое средство. Аналогичен подход и агроинженерии, рассматривающий воздействие системы «орудие – тяговое средство». Для исследователей элементов земледелия, оперирующих недифференцированными понятиями, напротив, уплотняющее воздействие машинно-тракторных агрегатов (МТА) явно на периферии сознания. Оценивая вспашку по небольшому объему выборки, они регистрируют сплошную плужную подошву, не выявляя, к примеру, локальное переуплотнение подпахотного слоя колесами, идущего по борозде трактора. Вместо того чтобы направить усилия на идентификацию данного техногенного локального переуплотнения, исследователи исключают «выбросы» при первичном контроле дат, теряя уже не актуальную периферийную, а перспективную базовую информацию. Не все благополучно и с операциональностью определения понятий, но этот вопрос оставляем без обсуждения.

Возможно, ли актуализировать или удачно подобрать имена, наводящие исследователей на приемлемые геометрию, размеры и локализацию участка отбора проб для получения распределенных агрофизических данных в технологиях точного земледелия и с какими препятствиями обращения термина в информационном пространстве можно оказаться с позиции научного терминотворчества?



Ответ на первую часть вопроса проиллюстрируем на собственном опыте создания терминологического словосочетания «агрофизический технологический контур» (АТК¹), который, по нашему мнению, имеет потенциал к обращению.

Поскольку исследование агрофизических свойств почвы нередко связано с отрицательным воздействием на экспериментальные посевы, то требовалось обозначение минимальной части делянки, репрезентирующей комплексное техногенное воздействие агрегата на физическое состояние. В рамках методической постановки, не нарушая принципов семантики, мог подходить составной термин с модальным смысловым компонентом отражаемого содержания. Адекватными именами оказались «комплекс» и «контур», требующие согласования с прилагательными. Определение «агрофизический», четко ориентировало на предметную область объекта (почвы), а смысл определения «технологический» подчеркивал идеологию современного агропроизводства. В виду доминантной роли нормативных ограничений величины и места площадки опробования в сохранении экспериментальных посевов, в качестве исходного наименования более приемлем не «комплекс», а «контур».

Проведенный поиск в базах GOOGLE показал, что специалисты (агрофизики) редко использовали термин АТК в работах методического характера, что возможно обусловлено как сложностью поиска составных терминов в сети Интернет, так и «громоздкостью» языкового выражения. По нашему мнению, при всей сложности терминологического сочетания АТК методическая доминанта мысли передается достаточно верно.

Таким образом, данный термин обладает эвристическим потенциалом и имеет шансы на использование и обращение в информационном пространстве, в качестве ключевого словосочетания, в том числе для поисковой оптимизации.

Вопрос о терминах в специальной литературе один из источников зачастую бесплодных дискуссий, в силу чего не слишком любимый исследователями. Однако из-за опасности омонимии для образования, так и для предстоящего перехода к трансляционным исследованиям, несмотря на взрывной рост 3D-технологий, его значение актуально.

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента. № 642, 2916. 1 декабря. <https://www.hse.ru/data/2018/06/10/1149858295/%D0%9C%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B0%D0%B5%D0%B2%20%D0%9C.%D0%A8.pdf>
2. Smart Farming, or the Future of Agriculture. <https://medium.com/sciforce/smart-farming-or-the-future-of-agriculture-359f0089df69>
3. Mit-Fahrspur-Management-weniger-Bodenverdichtung/ Landwirtschaftliche Wochenblatt/ 2018, Verlag Eugen Ullmer, Stuttgart 3S. Доступный доступ 15.05.19. <https://www.bwagrar.de/Technik/Mit-Fahrspur-Management-weniger-Bodenverdichtung,QUIEPTU4Mjg1MzMmTUIEPTUyOTI3.html>, доступ .25.03.2019.
4. Хохлов Н.Ф. Методологические основы совершенствования агрофизической оценки элементов систем земледелия в длительном полевом опыте. Автореф. дисс. докт. с.-х. наук. СПб. 2001, 40 с.
5. Земледелие. Термины и определения. ГОСТ 16265-89. Издательство стандартов, 1990, 21с.

¹ Изначально АТК включало наряду с контуром имя «комплекс». АТК использовалось для обозначения части поля (в стационарном опыте - площадки опробования), с определенной геометрией и величиной размещении точек опробования.



СЕКЦИЯ 6. ПОЧВЫ РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ И ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ



UDC:631.4

IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF TECHNOZEM UP TO 20 YEARS AFTER THE BEGINNING OF RECLAMATION

Androkhanov V.A.¹, Khozhina E.I.²

Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
androhanov@issa-siberia.ru

Stantec Consulting Inc., 500-311 Portage Avenue, Winnipeg, Manitoba, R3B 2B9, Canada,
Elena.Khozhina@Stantec.com or ekhozhina@gmail.com

Annotation: Changes of technozem physical properties over time as part of reclamation of Nazarovsky brown coal mine wastes were studied one, three, 10 and 20 years after the beginning of reclamation. Some physical properties (bulk density, porosity) were gradually improving over time reaching alkali chernozem levels at a reference site.

Introduction

One of the most effective techniques of reclamation of coal mine wastes is respreading of preliminary stripped top- and subsoil (fertile soil material or FSM) on the surface of the wastes. The FSM is a man-made soil called techno-soil or technozem (Kurachev, Androkhanov, 2002), or technogenic surface formations (TSFs) (Shishov, Tonkonogov, Gerasimova, Lebedeva, 2005).

Existing studies of the physical properties of technozem lack investigation of the changes of these properties over time, which might lead to negative economic and environmental impacts in the future.

The process of formation of technozem includes mine stripping of top- and subsoil, stockpiling FSM, excavation of FSM from the stockpiles, and respreading FSM within a reclamation area (Androkhanov, Ovsyannikova, Kurachev 2000). Properties of FSM during these steps are changing. In original soils before stripping, the state and functioning of the fertile soil layer is determined by the process of soil formation and biological, geochemical and other types of linkages between genetical horizons. In FSM, the original genetic linkages between the soil horizons are disconnected and the original soil properties are negatively impacted.

To reduce the negative impact and to increase the land use potential, agrological methods are used for reclamation of technozem. A typical time period for the reclamation is three to five years, which in some cases could be extended to 10 years and longer. In this case, there is a gradual restoration of the properties and the formation of soil regimes. The greatest transformations under the influence of climatic and biological factors undergo physical properties and modes of technozems - aggregate composition, density and porosity.

The objective of this study was to investigate the rate of transformation of the physical properties of technozem over time measuring the properties at different time intervals starting from the beginning of reclamation.

Study site and methods

The study was carried out at the Nazarovsky brown coal mine in Nazarovsky ravine. The ravine is located within a forest-steppe area of the Krasnoyarsk region, which contains alkali chernozem (dark humus horizon) and meadow-chernozemic soils (Bugakov, 1981; Shishov, Tonkonogov, Gerasimova, Lebedeva, 2005). Consequently, the fertile soil material respreaded on the surface of the coal mine wastes consisted of humus-accumulative A Horizon (or topsoil), transitional AB



Horizon (with characteristics from overlying A Horizon and underlying B Horizon) and small amounts of B Horizon (or subsoil).

Prior to respreading, FSM was stockpiled during 5 to 10 years. The height of the stockpiles was 8 meters. Due to compaction of the FSM during soil stripping and stockpiling with the use of heavy mining equipment, density inside the stockpiles was up to 1.8 g/cm^3 . Due to the addition of the soil material from B Horizon that contained carbonates, calcium carbonate cement was formed in FSM aggregates increasing their density and strength. The amount of the cement formations depended on the quality of the soil stripping processing. The cement formations were produced by nucleation and were generally irregularly distributed within the stockpiles.

Five sites were selected for the study (study sites) as follows:

- Site 1 – 1 year after respreading FSM;
- Site 2 – 3 years after respreading FSM;
- Site 3 – 10 years after respreading FSM;
- Site 4 – 20 years after respreading FSM; and
- Reference site – alkali chernozem.

All study sites were located within a plateau area with flat terrain. The soil type within the study sites was automorphic (wetting through precipitation only). The thickness of FSM layers at Site 1 to 4 and alkali chernozem within the reference site was approximately 60 cm. Tillage treatment (deep ripping) was applied at the initial reclamation stage after respreading of the FSM to decrease the bulk density of FSM and underlying coal waste layer. The vegetation cover consisted of seeded alfalfa within Site 1 to 3 and a grassy meadow developed naturally within Site 4 during the period of 20 years. All study sites were not used, with exception of Site 3, which was used for forages and pasture.

The study was carried out *in situ* and in laboratory conditions for three years. Density of solid particles was analyzed using pycnometer method, bulk density using Kachinsky's core method, density of aggregates by immersing in kerosene, and particle size using the hydrometer method that determines the distribution of the particle sizes by sedimentation process (Vadunina, Korchagina, 1986).

Results and discussion

Due to mixing of original soil horizons (A, AB, and B) during soil stripping, stockpiling, and respreading, the structure of original soil profiles and the natural particle size distribution typical for the reference site was eliminated (Fig. 1). Technozem within the study sites was clay (more than 70% clay), and the underlying coal wastes was sandy loam to loamy sand, which created a specific water and geochemical regimes in technozem. Periodic stagnation of water took place at the boundary between the two layers due to higher bulk density (up to 1.9 g/cm^3), lower porosity (less than 45%), and lack of capillaries and cracks in the underlying coal wastes (Shein, Shcheglov, Umarova, Sokolova, Milanovskii, 2009).

Therefore, man-made formations of coal wastes covered with FSM lack interaction between technozem and the underlying coal waste layer. Penetration of water and plant roots into the underlying coal wastes, and the development of a vegetation cover were difficult. Differentiation of the TSFs into soil horizons and development of genetical linkages between the horizons was not present compared to the reference site.

There was no significant difference between density of solid particles at different depths in the FSM and in alkali chernozem at the reference site most likely due to mixing of original soil horizons during formation of the FSM and due to land use within the study area (Table 1).



The bulk density was greater in younger FSM and lower in older FSM and varied from 1.40 g/cm³ to 1.69 g/cm³ after the first year (Site 1), from 1.18 g/cm³ to 1.71 g/cm³ after three years (Site 2), from 1.15 g/cm³ to 1.56 g/cm³ after 10 years (Site 3), and from 0.91 g/cm³ to 1.48 g/cm³ after 20 years (Site 4) (Table 1).

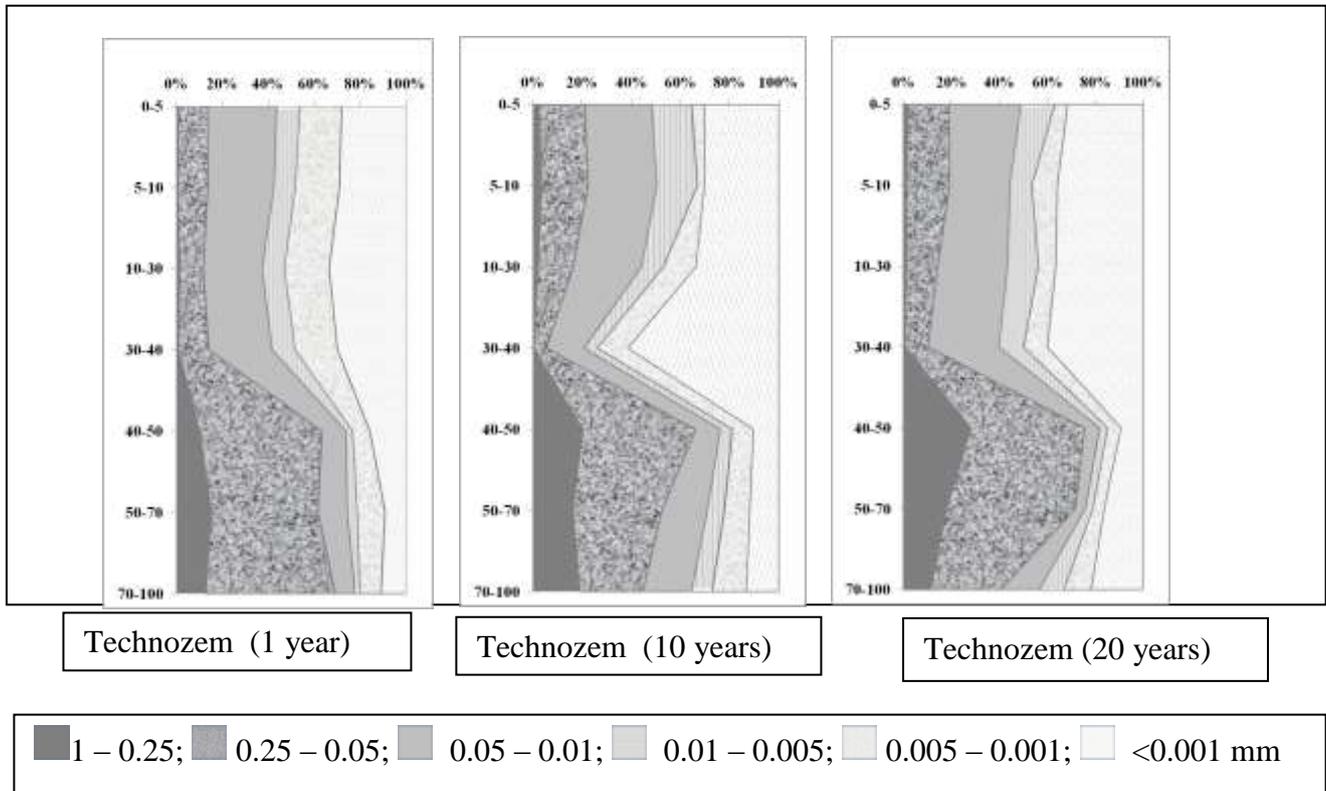


Fig. 1. Particle size distribution in technozem

The difference in bulk density was the largest between Site 1 (youngest FSM) and the reference site due to compaction of FSM during respreading. The compaction level depended on the type of mining equipment used and the moisture content in FSM, which was up to 20% at the time of respreading conducted during summer period. Since the bulk density was increased, the porosity at Site 1 (from 35.7% to 44.7%) was decreased and was lower than the porosity at the reference site (from 45.7% to 59.3%) (Table 1). Density of aggregates one year after respreading (from 1.79 g/cm³ to 1.89 g/cm³) was increased and greater than the reference density of aggregates (from 1.51 g/cm³ to 1.66 g/cm³) most likely due to the long-term storage of FSM in stockpiles prior to respreading.

Three years after respreading FSM, the bulk density (1.18 g/cm³) at the top (0-10 cm) was similar to the bulk density (1.03 g/cm³) at the top of the reference site (Table 1). However, the bulk density (1.71 g/cm³) at the lowest depth (50-60 cm) three years after respreading remained high and similar to the bulk density (1.69 g/cm³) at the lowest depth after year 1. Twenty years after respreading FSM, the bulk densities at Site 4 (from 0.91 g/cm³ to 1.48 g/cm³) and the reference site (from 1.03 g/cm³ to 1.44 g/cm³) were similar.

Reclamation techniques, including tillage at the initial stage and seeding perennial grasses, facilitate decrease of bulk density and increase of porosity in technozem. Perennial grasses can stabilize bulk density and porosity along the whole depth of technozem; however, this requires a long-term period of up to 20 years. Another aspect that impacted improvement of bulk density of technozem was the type of land use applied within the reclaimed areas. Site 3, Year 10, was used for



forages and pasture and Site 4, Year 20, was not in use. Consequently, the bulk density at Site 3 was similar to the bulk density of agricultural lands, and the bulk density at Site 4 was similar to the alkali chernozem within the reference site.

Table 1. Physical properties of technozem

| Depth | Density of solid particles (g/cm ³) | Bulk density (g/cm ³) | Density of aggregates (g/cm ³) | Porosity (g/cm ³) | Porosity of aggregates (g/cm ³) |
|---|---|-----------------------------------|--|-------------------------------|---|
| Year 1 (Not in use) | | | | | |
| 0-10 | 2.54 | 1.43 | 1.85 | 43.7 | 28.1 |
| 15-25 | 2.56 | 1.47 | 1.89 | 42.6 | 26.2 |
| 30-40 | 2.53 | 1.40 | 1.79 | 44.7 | 29.8 |
| 50-60 | 2.63 | 1.69 | - | 35.7 | - |
| Year 3 (Not in use) | | | | | |
| 0-10 | 2.53 | 1.18 | 1.70 | 55.7 | 34.5 |
| 15-25 | 2.57 | 1.29 | 1.65 | 49.8 | 35.8 |
| 30-40 | 2.58 | 1.38 | 1.77 | 46.5 | 31.5 |
| 50-60 | 2.67 | 1.71 | - | 35.9 | - |
| Year 10 (Used for forages and pasture) | | | | | |
| 0-10 | 2.56 | 1.15 | 1.73 | 55.1 | 34.0 |
| 15-25 | 2.60 | 1.33 | 1.71 | 48.9 | 34.2 |
| 30-40 | 2.57 | 1.29 | 1.76 | 49.8 | 31.5 |
| 50-60 | 2.71 | 1.56 | - | 42.4 | - |
| Year 20 (Not in use) | | | | | |
| 0-10 | 2.50 | 0.91 | 1.50 | 63.6 | 40.0 |
| 15-25 | 2.52 | 1.13 | 1.54 | 55.2 | 38.9 |
| 30-40 | 2.55 | 1.17 | 1.54 | 54.1 | 39.6 |
| 50-60 | 2.68 | 1.48 | - | 44.8 | - |
| Reference (Alkali chernozem) | | | | | |
| 0-10 | 2.52 | 1.03 | 1.56 | 59.3 | 38.3 |
| 15-25 | 2.55 | 1.22 | 1.51 | 52.2 | 40.8 |
| 30-40 | 2.56 | 1.31 | 1.66 | 48.8 | 35.2 |
| 50-60 | 2.65 | 1.44 | - | 45.7 | - |

Conclusions

The results of the study of technozem at varying durations since the initial stage of reclamation of the waste area of the Nazarovsky brown coal mine indicated the lack of differentiation of technozem into soil horizons and development of genetical linkages between the horizons. However, physical properties of technozem, including bulk density and porosity were gradually improving over time and reaching the level of the bulk density and porosity in alkali chernozem at the reference site after 20 years since the initial reclamation. Land use of reclaimed areas, including forages and pasture, could slow down the improvement of the physical properties of technozem.

Acknowledgment

The work was carried out with support from the Institute of Soil Science and Agrochemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.



References

- Androkhanov V.A., Ovsyannikova S.V., Kurachev V.M. (2000) Technozem: properties, regimes, functioning. Novosibirsk: Siberian publishing firm RAN “Nauka”. 200 p.
- Bugakov P.S. (1981) Characteristics of the soil cover of the western area of KATEK. In: Soils of KATEK area. ILiD SO AN SSSR. PP. 19-25.
- Kurachev V.M., Androkhanov V.M. (2002) Classification of soils of technogenic landscapes. *Siberian journal of ecology* **3**. 255-261.
- Shein E.V., Shcheglov D.I., Umarova A.B., Sokolova I.V., Milanovskii E.Yu. (2009) Structural Status of Technogenic Soils and the Development of Preferential Water Flows. *Eurasian Soil Science* **42**. 636–644.
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Gerasimova M.I., and Lebedeva I.I. (2005) New Classification System of Russian Soils. *Eurasian Soil Science* **38**. S35–S43.
https://www.researchgate.net/profile/M_Gerasimova/publication/286764716_New_classification_system_of_Russian_soils/links/598a090f45851519f106c31c/New-classification-system-of-Russian-soils.pdf?origin=publication_detail
- Vadunina A.F., Korchagina Z.A. (1986) Methods of investigation of the physical properties of soils. M: “Agropromizdat”. 416 p.



TOTAL AND AVAILABLE HEAVY METAL CONCENTRATIONS OF TYPIC XERORTENT SOIL AFTER CONSECUTIVELY TWO YEARS TREATED SEWAGE SLUDGE APPLICATIONS

Delibacak S¹, Ongun A R¹,

¹Ege University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition
35100 Bornova İzmir Turkey sezai.delibacak@ege.edu.tr ongunali@gmail.com

Introduction

Treated Sewage Sludge (TSS) is an ultimate product of municipal wastewater treatment plant and highly enriched in organic matter (OM). TSS can be recycled in various ways, including its use as fertilizer, as a soil conditioner in farmland, in forests and in home gardens (Dolgen et al., 2007). TSS contains macronutrients and trace elements. These attributes potentially make TSS an excellent fertilizer at very low cost for agricultural land in Turkey which is generally rich in lime, low in OM. The positive effect of sewage sludge on soil properties has been evidenced in numerous papers by researchers (Klasa et al., 2007; Singh and Agrawal, 2008; Delibacak et al., 2009). However, special care should be taken with respect to micronutrients and heavy metals so as not to introduce excessive amounts of these elements, which could have an adverse effect on the environment, especially when soil is acidic (Delibacak et al., 2009; Pascual et al., 2004). The purpose of this work was to evaluate the effect of consecutively two years TSS applications on the concentration of total and available forms of Cu, Cd, Cr, Ni, Pb and Zn in a sandy clay soil (Typic Xerortent) during five different periods in two years.

Objects and methods

The experiment was conducted at the research field of Aegean Agricultural Research Institute in Menemen plain, Izmir, Turkey (Western Anatolia region of Turkey 38°56'87.96"-38°56'91.02"N; 27°03'57.52"-27°03'58.61"E). The investigated soil is characterized by sandy clay texture with slightly alkaline reaction and classified as a Typic Xerortent (Soil Survey Staff, 2006). Some selected properties and total heavy metal concentrations in the experimental soil and TSS used in the experiment are given in Table 1 and 2.

Table 1. Some selected properties and total heavy metal concentrations of experimental soil

| | | | | | |
|-------------------|-----|------------|----|--------------------|-------|
| Sand | (%) | 43.84 | pH | (Saturation paste) | 7.71 |
| Silt | (%) | 16.44 | Pb | mg/kg | 16.40 |
| Clay | (%) | 39.72 | Cu | mg/kg | 17.28 |
| Texture | | Sandy clay | Zn | mg/kg | 46.10 |
| Salt | (%) | 0.165 | Cd | mg/kg | 0.76 |
| CaCO ₃ | (%) | 0.63 | Cr | mg/kg | 15.00 |
| Organic matter | (%) | 1.53 | Ni | mg/kg | 24.68 |

The field study was conducted in 20 parcels in a randomized-block design with four repetitions, during 2011-2012. The parcel dimensions were 3 m x 3 m. The TSS used in the experiment was obtained from the wastewater treatment plant of Metropolitan Region, Izmir city. Calcium oxide (CaO) was added to raise the efficiency of the dewatering process of sewage sludge (SS). In addition, the SS produced presented a pH varying between 10 and 13, what increased the pathogen control



and decreased the heavy metal availability by added calcium oxide. TSS was added to the experimental soil under investigation at the rates of 12.5 t.ha⁻¹; 25.0 t. ha⁻¹; 37.5 t.ha⁻¹ as dry matter on July 14, 2011. Also 150 kg N, 150 kg P₂O₅, 150 kg K₂O ha⁻¹ (1000 kg ha⁻¹ 15.15.15. composed fertilizer) were applied to the only mineral fertilizer parcels at the same time and mixed with soil to 15 cm depth by rotatiller. Control parcels were not treated. Corn seeds (*Zea mays* L. var. ZP 737) were sown with seeding machine on rows 18 cm and in rows 70 cm apart. Drop irrigation was provided when required. Harvest of corn was done by hands on November 17, 2011. Wheat seeds (*Triticum durum* L. var. Ege 88) were sown with seeding machine on November 22, 2011 to 5 cm of soil depth as second crop. Also 80 kg N and 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ (400 kg ha⁻¹20.20.0. composed fertilizer) were applied to the only mineral fertilizer parcels at the same time and mixed with soil to 15 cm depth before wheat seeding. Wheat was harvested with machine on July 10, 2012. Second year, again TSS was added to the experimental soil under investigation at the rates of 12.5 t.ha⁻¹; 25.0 t. ha⁻¹; 37.5 t.ha⁻¹ as dry matter on July 14, 2012. Also 150 kg N, 150 kg P₂O₅, 150 kg K₂O ha⁻¹ (1000 kg ha⁻¹ 15.15.15. composed fertilizer) were applied to the only mineral fertilizer plots at the same time and mixed with soil to 15 cm depth by rotatiller before corn seeding. Harvest of second year's corn was done by hands on November 1, 2012.

Table 2. Some selected properties and total heavy metal concentrations of treated sewage sludge used in the experiment

| | | | | | |
|-------------------|------|-------|-----------------|-------|-------|
| EC | dS/m | 16.35 | Fe ¹ | % | 1.14 |
| CaCO ₃ | (%) | 10.24 | Cu ¹ | mg/kg | 268.8 |
| Org. matter | (%) | 70.32 | Zn ¹ | mg/kg | 1335 |
| Org. C | (%) | 40.79 | Mn ¹ | mg/kg | 298.6 |
| N ¹ | (%) | 5.33 | B ¹ | mg/kg | 35.2 |
| P ¹ | (%) | 1.33 | Co ¹ | mg/kg | 14.2 |
| K ¹ | (%) | 0.68 | Cd ¹ | mg/kg | 4.1 |
| Ca ¹ | (%) | 3.74 | Cr ¹ | mg/kg | 250.6 |
| Mg ¹ | (%) | 0.68 | Ni ¹ | mg/kg | 115.4 |
| Na ¹ | (%) | 0.59 | Pb ¹ | mg/kg | 199.4 |

¹Total

Soil sampling and analyses

During the experiment, all soil samples were taken from each parcel in 18 cm depth (Ap horizon) in five different periods (1st, August 11, 2011-3 weeks after sowing of corn; 2nd, November 17, 2011-after corn harvest; 3rd, July 11, 2012-after wheat harvest; 4th, August 7, 2012-3 weeks after sowing of second year corn; 5th, November 1, 2012- after corn harvest of second year). The samples were air-dried and sieved using 2-mm sieve. The macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and Na) and heavy metal (Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni and Pb) concentrations of soil were determined. Particle size (Bouyoucos, 1962), Total salt, OM concentration, CaCO₃, pH, total N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni and Pb concentrations of soil samples and TSS were all determined according to Page et al., 1982). Available P in soil was determined by NaHCO₃ extract (Olsen et al., 1954). Available Ca, Mg, K and Na were analyzed with 1N NH₄OAc extract method. Ca, K and Na were determined by flame emission spectrometry and Mg was determined by flame atomic absorption spectrometry (AAS) (Kacar, 1994). Mn, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni and Pb were extracted using DTPA (diethylenetriaminepentaacetate) solution (Lindsay and Norvell, 1978). The concentrations of these elements in the extracts were determined by AAS (AOAC, 1990). Data were analyzed using the Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) version 17 (SPSS 17.0 2008). Tukey test was used to find if differences in the treatments were significant at P≤0.01 or P≤0.05 (Steel and Torrie, 1980).



Results and discussion

According to the results, the average total Cu, Cr and Zn concentrations of the soil samples taken at 5 different periods in 2 years from the experimental soil showed statistically significant changes with consecutively two years and increasing TSS applications when compared with control and mineral fertilizer (Table 3). In other words, total Cu, Cr and Zn concentrations of the experimental soil were increased by consecutively two years and increasing TSS applications. These significant increases in soil can be attributed to the high amount of Cu, Cr and Zn contained in the TSS (268.8 mg.kg⁻¹ Cu; 250.6 mg.kg⁻¹ Cr; 1335 mg.kg⁻¹ Zn) and consecutively two years TSS applications. Despite these increases, total Cu, Cr and Zn concentrations of experimental soil were found under the threshold values in all sampling periods in this study. On the other hand, the average total Cd, Ni and Pb concentration of the soil samples taken at 5 different periods in 2 years from the experimental soil did not showed statistically significant changes with consecutively two years and increasing TSS applications when compared with control and mineral fertilizer. These insignificant increases in soil can be attributed to the low levels of these heavy metals in TSS. Lopez-Mosquera et al. (2000) suggested that short or medium term application of sludge did not lead to harmful accumulation of heavy metals, but Selivanovskaya et al. (2001) stated that Cu, Cr, Pb, Cd, Ni and Zn concentrations in soil increased with sludge addition. Threshold values of heavy metals in soil were given in official gazette of Turkey as 100 mg/kg Pb; 1.5 mg/kg Cd; 100 mg/kg Cr; 100 mg/kg Cu; 70 mg/kg Ni and 200 mg/kg Zn, respectively (Ministry of Environment and Urbanization, 2010).

Table 3. Effect of consecutively two years treated sewage sludge (TSS) applications on total Cu, Cd, Cr, Ni, Pb and Zn (mg/kg) concentrations of sandy clay soil

| Applications | Average of 5 soil sampling periods | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| | Total Cu Tukey: P≤ 0.01 | Total Cd Tukey:ns | Total Cr Tukey:P≤0.0 1 | Total Ni Tukey:ns | Total Pb Tukey:ns | Total Zn Tukey: P≤ 0.01 |
| Control | 19.04 c | 0.66 a | 17.11 bc | 25.27 a | 16.80 a | 53.36 c |
| Fertilizer | 18.95 c | 0.68 a | 16.53 c | 25.06 a | 16.90 a | 53.49 c |
| 12.5 t.ha ⁻¹ TSS | 20.23 bc | 0.71 a | 17.21 bc | 25.85 a | 17.48 a | 59.11 bc |
| 25.0 t.ha ⁻¹ TSS | 21.73 ab | 0.72 a | 18.75 ab | 26.63 a | 17.75 a | 64.30 ab |
| 37.5 t.ha ⁻¹ TSS | 22.2 a | 0.70 a | 19.48 a | 26.19 a | 17.50 a | 70.79 a |
| | ** | | ** | | | ** |

Significant differences between treatments at ** P≤ 0.01 or * P≤ 0.05 level indicated by different letters.

The average available (DTPA-extractable) Cu, Cd, Cr, Ni, Pb and Zn concentrations of the soil samples taken at 5 different periods in 2 years from the experimental soil showed statistically significant changes with consecutively two years and increasing doses of TSS applications when compared with the control and mineral fertilizer applications (Table 4). Analogously to our study, Delibacak et al. (2009) found out an increase in the concentrations of soluble Cu and Zn in soil caused by increasing doses of sewage sludge introduced to soil. In contrast, Pascual et al. (2004) showed depressed concentrations of available forms of Cu and Zn in soil under the influence of a higher dose of sewage sludge (140 t.ha⁻¹). Sienkiewicz and Czarnecka (2012) reported that as the dose of sewage sludge added to soil increased, so did the content of soluble zinc in soil. The highest dose of sewage sludge (280 t.ha⁻¹) caused an over 36% increase in the concentration of this element in soil compared to the control soil in their research. In another study, available soil Cu, Zn, Fe and



Mn were increased by application of sewage sludge, which contained considerable quantities of these metals (Nielsen et al., 2003). It is remarkable the importance of texture for controlling heavy metal availability. It has been demonstrated by several works the lower sorption capacity for heavy metals in sandy soils compared to loamy or clayey soils (McBride, 2003; Hooda and Alloway, 1994; Planquart et al., 1999; Basta et al., 2005).

Table 4. Effect of consecutively two years treated sewage sludge (TSS) applications on available (DTPA-extractable) Cu, Cd, Cr, Ni, Pb and Zn (mg/kg) concentrations of sandy clay soil

| Applications | Average of 5 soil sampling periods | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | Available Cu ***P≤ 0.01 | Available Cd P≤ 0.01 | Available Cr P≤0.01 | Available Ni P≤ 0.01 | Available Pb P≤ 0.01 | Available Zn P≤ 0.01 |
| Control | 1.17 c | 0.037 bc | 0.590 d | 0.426 b | 0.688 b | 1.58 d |
| Fertilizer | 1.26 c | 0.035 c | 0.656 d | 0.476 b | 0.700 b | 1.61 d |
| 12.5 t.ha ⁻¹ TSS | 1.82 b | 0.039 abc | 0.853 c | 0.601 b | 0.755 ab | 2.45 c |
| 25.0 t.ha ⁻¹ TSS | 2.45 a | 0.045 ab | 0.929 b | 0.878 a | 0.901 a | 3.42 b |
| 37.5 t.ha ⁻¹ TSS | 2.88 a | 0.048 a | 1.034 a | 1.016 a | 0.899 a | 4.59 a |
| | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

Significant differences between treatments at ** P≤ 0.01 or * P≤ 0.05 level indicated by different letters.

***Tukey

Conclusion

In our study, we found that all total heavy metal levels of soil were under threshold values of official limits at the end of the study. Therefore, we concluded that TSS could be used to improve soil properties and to prevent possible especially Cu and Zn deficiencies in soils of Turkey with taking into consideration of heavy metals in TSS for environmental concerns. Consequently, the recycling of sewage sludge to agricultural lands may be recommended as a positive activity in accordance with the sustainability of good agricultural practices. We suggest that applying sewage sludge and other organic materials to lands, for agricultural benefit or ecological improvement, is likely to be the best practicable environmental option in most circumstances, although the suitability of sludge spreading will vary depending on local conditions. However, further studies must be carried out in the next years to confirm the positive long-term effects of TSS in order to maintain and improve soil properties.

Acknowledgment

We thank the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK) for financial support (Project no: 108G167).

References

- AOAC: (1990) Official methods of analysis In: Helrich K (ed) Association of official analytical chemists, Washington, DC.
- Basta N.T., Ryan J.A., Chaney R.L. (2005) Trace element chemistry in residual-treated soils: key concepts and metal bioavailability. *Journal of Environmental Quality*, **34** 49–63.
- Bouyoucos G.J. (1962) Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil, *Agronomy Journal*, **54**(5) 464–465.



- Delibacak S., Okur B., Ongun A.R. (2009) Influence of treated sewage sludge applications on temporal variations of plant nutrients and heavy metals in a Typic Xerofluvent soil, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **83** 249–257.
- Dolgen D., Alpaslan M.N., Delen N. (2007) Agricultural recycling of treatment-plant sludge: a case study for a vegetable-processing factory, *J. Environ. Manage.*, **84**(3) 274–281.
- Hooda P.S., Alloway B.J. (1994) The plant availability and DTPA extractability of trace metals in sludge-amended soils. *Science of the Total Environment*, **149** 1–2 39–51.
- Kacar B. (1994) Chemical analysis of plant and soil: III soil analysis. Ankara University, Faculty of Agriculture, Education Res. & Extension Found. Publications: 3 Ankara (in Turkish).
- Klasa A., Gotkiewicz W., Czaplá J. (2007) Modifications of physico-chemical soil properties following application of sewage sludge as soil amendment, *J. Elemental.*, **12**(4) 287–302.
- Lindsay W.L., Norvell W.A. (1978) Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42** 421–428.
- Lopez-Mosquera M.E., Moiron C., Carral E. (2000) Use of dairy industry sludge as fertiliser for grasslands in northwest Spain: heavy metal levels in the soil and plants. *Resources, Conservation and Recycling*, **30** 95–109.
- McBride M.B. (2003) Toxic metals in sewage sludge amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? *Advances in Environmental Research*, **8** 5–19.
- Ministry of Environment and Urbanization, (2010) Regulation on the Land Use of Domestic and Urban Sludges. Official Gazette No: 27661, Ankara, Turkey.
- Neilsen G.H., Hogue E.J., Forge T., Neilsen D. (2003) Surface application of mulches and biosolids affect orchard soil properties after 7 years, *Canadian Journal of Soil Science*, **83** 131–137.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., Dean L.A. (1954) Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dep. Agric.Circ.939, USDA Washington, DC.
- Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R., (Eds.) (1982) In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA-SSA, Madison, USA.
- Pascual I., Antolín M.C., García C., Polo A., Sánchez-Díaz M. (2004) Plant availability of heavy metals in a soil amended with a high dose of sewage sludge under drought conditions, *Biol. Fertil. Soils*, **40** 291–299.
- Planquart P., Bonin G., Prone A., Masiani C. (1999) Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: Application to low metal loadings. *Science of the Total Environment*, **241** 161–179.
- Selivanovskaya S.Y., Latypova V.Z., Kiyamova S.N., Alimova F.K. (2001) Use of microbial parameters to access treatment methods of municipal sewage sludge applied to grey forest soils of Tatarstan. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, **86** 145–153.
- Sienkiewicz S., Czarnecka M.H. (2012) Content of available Cu, Zn and Mn in soil amended with municipal sewage sludge. *j. Elem.*, **17** (4) 649–657.
- Singh R.P., Agrawal M. (2008) Potential benefits and risks of land application of sewage sludge, *Waste Manage.*, **28** 347–358.
- Soil Survey Staff, (2006) *Keys to soil taxonomy*. 10th ed. Washington DC, USA: US Government Printing Office.
- SPSS 17.0 (2008) SPSS 17.0 for Windows. Chicago, IL, SPSS Inc.
- Steel R.G.D., Torrie J.H. (1980) Principles and Procedures of Statistics, Second Edition, New York: McGraw-Hill Book Co.



УДК 631.4+504.054

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДИКТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ МЕГАПОЛИСА

Азовцева Н.А.¹, Смагин А.В.^{2,3}, Садовникова Н.Б.^{2,3}, Кириченко А.В.²

¹ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАН, Москва, РФ, azovtseva@mail.ru

² Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ

³ Российский университет дружбы народов, Москва, РФ.

Аннотация. Исследуется проблема количественной оценки загрязнения почв столичного мегаполиса в зависимости от контролируемых почвенных физико-химических факторов твердой и жидкой фаз. В качестве интегрального показателя загрязнения использованы величины запасов тяжелых металлов 1, 2 класса опасности, учитывающие наряду с массовой долей, варьирование плотности сложения почвы. Выявлена множественная регрессия ($R^2=0,91-0,95$) послойных запасов ТМ, а также запасов биофильных элементов обменного фонда от двух главных предикторов – дисперсности (эффективной удельной поверхности твердой, определенной оригинальным термодесорбционным методом) и рН солевой вытяжки. The problem of quantitative assessment of soil pollution of the capital metropolis by controlling physico-chemical factors of solid and liquid phases of soil is investigated. As an integral indicator of pollution, the values of reserves of heavy metals of 1, 2 hazard classes are used, taking into account, along with the mass fraction, the variation of soil bulk density. Multiple regression ($R^2=0.91-0.95$) of layered reserves of heavy metals, as well as reserves of biophilic elements of the exchange fund from two main predictors – dispersion (effective specific surface area of solid, determined by the original thermal desorption method) and pH of salt extraction was revealed.

Введение

В почвы мегаполиса поступают и накапливаются там выбросы промышленных предприятий и транспорта, причем для столичного мегаполиса доминирующим источником загрязнения (вклад до 70%) является автотранспорт. Наиболее опасным и стойким загрязнением является аккумуляция тяжелых металлов и металлоидов (ТМ), во многом определяющаяся поступлением в почвы аэрозольных выпадений [3, 4]. Техногенная пыль и воздушно-капельные аэрозоли приводят наряду с изменениями химического состава поверхностных горизонтов почвы к увеличению рН, содержания тонких фракций пыли и ила (дисперсности), органического углерода, что в свою очередь может служить физико-химическими факторами концентрирования и стабилизации ТМ. Цель исследования состояла в статистической оценке характеристик загрязнения почв Восточного и Северо-Восточного округов г. Москвы в зависимости от их физических, химических и физико-химических свойств для оперативного экологического контроля и нормирования техногенных воздействий.

Объекты и методы исследования

Исследования городских почв были проведены летом-осенью в 2017-2018 гг. в Северо-Восточном и Восточном административных округах города Москвы, почвы которых подвергаются загрязнению выбросами промышленных предприятий (Асфальтовый, Электро-механический, Московский маслонефтеперерабатывающий заводы, ЖБК «Ростокино») и автомобильных магистралей (ул. Верхоянская, ул. Летчика Бабушкина, Ярославская ж/д, пр. Серебрякова, ул. Амундсена) расположенных в непосредственной близости от трансект с точками пробоотбора Образцы почв отбирали послойно (шаг 7 см) из верхних горизонтов почв исследуемых участков до глубины 21 см буром Качинского для синхронной оценки плотности сложения почвы (ρ_b). Почвы представлены урбаноземами гумусированными

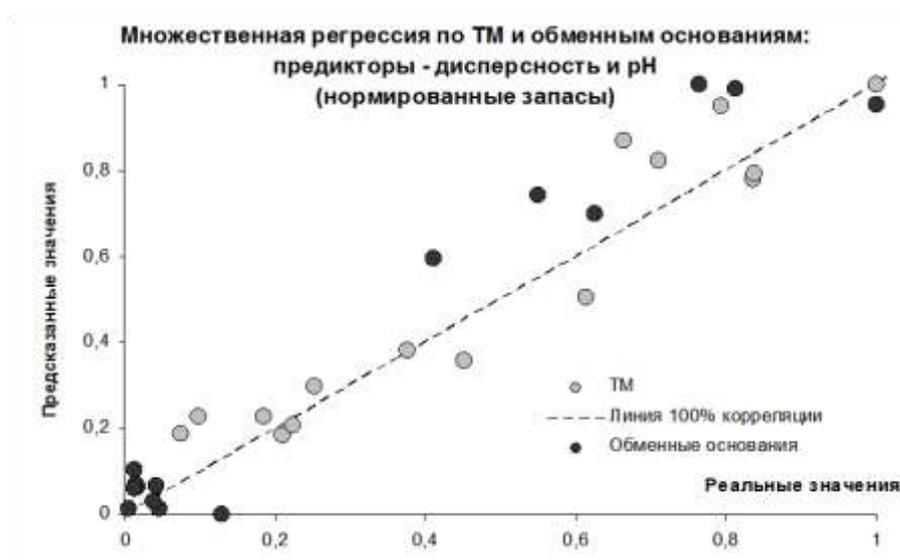


средне- и сильномоющими на культурном (техногенном) слое, подстилаемом покровными суглинками и флювиогляциальными отложениями. Относительно чистым фоном были выбраны урбодерново-подзолистые почвы на флювиогляциальных отложениях рекреационной зоны парка (50 м от пруда), окаймляемой с запада ул. Салтыковской (Новокосино). Всего было отобрано 57 смешанных проб в трёх повторностях, включая 8 на фоновой территории.

Определение подвижных форм тяжелых металлов: Co, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr, Mg, Fe производилось ацетатно-аммонийным буферным раствором pH 4,8 с последующим определением на AAS-3; определение $pH_{\text{водн}}$, $pH_{\text{сол}}$, потерь при прокаливании, содержания гумуса (по Тюрину), обменных катионов (по Шолленбергеру): K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} выполнено в сертифицированной лаборатории ИЛЦ ФГБНУ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева». Наряду с традиционными характеристиками загрязнения в виде массовых долей ТМ, по данным о (ρ_b) были рассчитаны интегральные по слою показатели – запасы ТМ, согласно рекомендациям [2]. Новым термодесорбционным методом [6] был определен интегральный показатель дисперсности твердой фазы – ее эффективной удельной поверхности (S). При этом для дифференциальной сушки образцов на стадиях 30, 40, 50, 60, 70, 80 °C был использован шкаф Binder (Германия), а для контроля относительной влажности воздуха в лаборатории - комбинированный измеритель TESTO 410-2 (Германия). Статистический анализ данных по [1] проводился в программе R 3.3.0 Windows с экспортом данных в электронные таблицы Microsoft Office Excel 2007.

Обсуждение результатов

Поиск коррелятивных зависимостей между традиционными показателями в виде массовых долей химических элементов друг с другом и свойствами почвы (pH, S, содержанием органического вещества, ЕКО, пористостью, полевой влажностью) редко давал сколь либо значимые результаты, и чаще всего величины коэффициентов детерминации здесь не превышали отметку 0,5. Использование вместо массовых долей величин объемных концентраций и суммарных запасов элементов по слоям 7 см мощности повысило коррелятивность и выявило достаточно тесные по [1] (R^2 0,64-0,82) связи этих показателей с потенциальными предикторами в виде pH, дисперсности, влажности, содержания гумуса и/или потерь при прокаливании.





Попытки использовать в качестве предикторов комбинации (отношения, произведения или суммы) нескольких показателей не сильно повысили тесноту связей, тогда как переход ко множественной регрессии четко выявил наиболее значимые для прогноза загрязнения ТМ и актуального плодородия (сумма обменных оснований) исследуемых городских почв предикторы. Ими оказались дисперсность (S) и $pH_{\text{сол}}$. Для послойных запасов ТМ соответствующая регрессионная модели (педотрансферная функция) выглядела как: $Z_{\text{ТМ}}=0,121*S+3,305*pH-12,578$, $R^2=0,91$ в диапазоне варьирования запасов ТМ по 7см слоям от $0,4 \text{ г/м}^2$ (фон, незагрязненные нижние горизонты) до 60 г/м^2 (автомагистрали, промзоны) и диапазонов $3,7 < pH < 7,3$ и дисперсности $22 \text{ м}^2/\text{г} < S < 70 \text{ м}^2/\text{г}$. Рисунок иллюстрирует связь между измеренными и предсказанными величинами запасов, нормированными их максимальными значениями.

Выводы

1. На фоне малых, часто не значимых статистически парных корреляций свойств между собой, получена четкая и высокая ($R^2=0,91-0,95$) множественная регрессия послойных (по 7см) запасов ТМ, а также запасов биофильных элементов обменного фонда от двух главных предикторов – дисперсности и pH .

2. Предположительно, дисперсность определяет удерживание твердой фазой, а pH мобильность/осаждение в растворе; полученный результат подтверждает перспективность принятой в РФ дифференциации ОДК (ГН 2.1.7.2511-09) в зависимости от дисперсности и pH , причем вместо словесной категории - «вид гранулометрического состава», предложен четкий показатель дисперсности - эффективная удельная поверхность твердой фазы почв.

Благодарности

Финансовая поддержка РФФ (проекты №№ 17-77-20046 и 19-77-30012)

Литература

1. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении: – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 328 с.
2. Korchagina K.V., Smagin A.V., Reshetina T.V. Assessing the Technogenic Contamination of Urban Soils from the Profile // Eurasian Soil Science, 2014, Vol. 47, No.8, pp. 824–833. DOI: 10.1134/S1064229314080080
3. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах. // Почвоведение. 2015. №5. С.536-553.
4. Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Long-Term Dynamics of Urban Soil Pollution with Heavy Metals in Moscow. Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science Volume 2016, Article ID 5602795, 10 pages DOI: 10.1155/2016/5602795
5. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2511–09 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.–10 с.
6. Smagin A.V. Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids. // Colloid Journal, 2016, Vol. 78, No. 3, pp. 391–396. DOI: 10.1134/S1061933X16030170



УДК 504.4.054 (571.62)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ И БИОТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ В ПОЧВОГРУНТАХ ПРОМЗОНЫ Г. ХАБАРОВСК

Гаретова Л.А.¹, Имранова Е.Л.¹, Кириенко О.А.¹, Кошельков А.М.¹, Фишер Н.К.¹, Климин М.А.¹,
Тюгай З.²

¹ИВЭП ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация

micro@ivep.as.khb.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

zemfira53@yandex.ru

DISTRIBUTION OF HYDROCARBONS AND BIOTIC COMPONENTS IN SOIL GROUNDS OF INDUSTRIAL ZONE OF KHABAROVSK

Garetova L.A.¹, Imranova E.L.¹, Kirienko O.A.¹, Koshelkov A.M.¹, Fisher N.K.¹, Klimin M.A.¹, Tugai Z.²

¹IVEP, FEB RAS, Khabarovsk, Russian Federation

micro@ivep.as.khb.ru

²Faculty of soil science MGU, Moscow, Russian Federation

zemfira53@yandex.ru

Annotation: Concentration of hydrocarbons in the surface layer (0-20 cm) of soil ground on technologically transformed territory was 400-4560 mg/kg. With increasing depth (20-50 cm) its content decreased from 830 to 560 mg/kg, decreased the electrolytic conductivity, pH of the aqueous extract, and the number of heterotrophic and hydrocarbon-oxidizing bacteria.

Введение

В результате мощного прессинга техногенных факторов на почвенный покров промышленных районов городов происходит глубокая трансформация почв. Антропогенные воздействия на почву приводят к загрязнению нефтепродуктами, тяжелыми металлами, ксенобиотиками, патогенными микроорганизмами и к ухудшению водно-физических и физико-механических свойств. Трансформированные почвы или урбаноземы теряют способность к восстановлению и самоочищению. Основными особенностями негативного воздействия нефти и нефтепродуктов (НП) на почвы являются: неравномерность загрязнения территорий самих объектов, локальные скопления НП в различных техногенных формах, которые, прежде всего, связаны со свойствами нефтей и НП, а также со свойствами самих почв (Глязнецова и др., 2016).

Город Хабаровск является одним из крупнейших промышленных центров на Дальнем Востоке. Его население по последним данным составляет более 600 тыс. чел. В настоящее время промышленные предприятия города сосредоточены в южной и юго-восточной окраинах города. Однако в центральной части Хабаровска существуют исторически сложившиеся промышленные агломераты, закладка которых приходилась на начало XX века, когда их территории являлись окраинами города. Развитие городской инфраструктуры, строительство крупных жилых массивов в центральной части города привело к тому, что промышленная зона перемежается с жилыми и культурными объектами, с участками малоэтажной застройки, пронизана железнодорожными ветками и автотранспортными магистралями.



Целью настоящей работы является изучение распределения нефтяных углеводородов, летучих органических соединений и биотических компонентов – фитопигментов и бактерий в почвогрунтах различных участков территории промзоны г. Хабаровска.

Объекты и методы

Район исследования находится в Кировском административном районе г. Хабаровска (Кировский промузел). На его территории расположено более 10 предприятий, крупнейшими из которых являются АО «ННК-Хабаровский нефтеперерабатывающий завод» (НПЗ) и СП «Хабаровская ТЭЦ-2». Пробы отбирали в период с 25.05 по 13.06. 2018 г. на 4-х участках, удаленных друг от друга на расстояние 500 м в северо-западном направлении. Массовую долю НП в образцах почвогрунтов определяли согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22–98 с использованием ИК-концентраметра КН-2 М (Сибэкоприбор, Россия). Анализ ЛОС в нативных образцах почвогрунтов осуществляли методом парофазного анализа в сочетании с газовой хроматографией на хроматографе Кристалл-5000.1. Фотосинтетические пигменты определяли согласно ГОСТу 17.1.4.02-90 в вариации применительно к определению растительных пигментов в донных отложениях (Сигарева, 2012). Концентрацию пигментов определяли на спектрофотометре Shimadzu UV-1650 PC. Численность бактерий в почвогрунтах определяли общепринятыми в микробиологии методами (Нетрусова, 2005).

Результаты и обсуждение

Исследованные образцы представляют собой предпочвенные образования. Они характеризуются общими морфологическими чертами и, в первую очередь, отсутствием почвенных горизонтов. Образцы №1 и №2 отобраны рядом с нефтеналивным причалом АО «ННК-Хабаровскнефтепродукт». Они представляют собой щебнисто-дресвянистый грунт с примесью незначительной части мелкозема, сырой, уплотненный, грязно-бурого цвета. Образец №1 отличался выраженным запахом нефтепродуктов. Образцы №3 и №4 отобраны из разреза в районе НПЗ в 500 м от нефтеналивного причала, образец №3 отобран с глубины 0-20 см, №4 с глубины 20-50 см. Оба образца являются песчанисто-галечным грунтом. Образец №5, отобранный за пределами НПЗ (на расстоянии 1 км), имеет ржаво-бурый цвет, с обилием сильно выветрелой дресвы и глинистых сланцев, мелкозем тяжело суглинистый, крупно-комковато-ореховой структуры, плотный.

Содержание НУ в приповерхностном слое почвогрунтов варьировало от 400 до 4560 мг/кг (табл.). Максимальное значение нефтяных углеводородов отмечено в образце №1, минимальное – в образце №5. Допустимое содержание НУ для почв и грунтов не нормируется. Рекомендуемые ориентировочно допустимые уровни (ОДК) по разным документам варьируют от 300 до 1000 мг/кг. Согласно градации Ю.И. Пиковского (1993) содержание углеводородов в исследованных образцах почвогрунтов определяется в диапазоне от «повышено-фоновое» (№ 5) до уровня «сильное» (№1).

Общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГ) в почвогрунтах составляла $27-47 \times 10^6$ КОЕ/г. Максимальное содержание бактерий было отмечено в образце №1 с самой высокой концентрацией нефтеуглеводородов (табл.). Загрязнение почвогрунтов углеводородами стимулирует развитие в микробном сообществе нефтеокисляющих бактерий (НОБ). Содержание НОБ в сообществе бактерий рассматриваемых почвогрунтов значительно превышало условный показатель равный 10%, принятый для незагрязненных грунтов, что в значительной мере подтверждает наличие хронического загрязнения исследованной территории НУ. Наиболее адаптированным к НУ оказалось сообщество почвогрунта в районе НПЗ (образец № 3), где выявлена максимальная численность НОБ.



Таблица. Содержание НУ, бактерий и фитопигментов в приповерхностном (0-20 см) слое почвогрунтов промзоны г. Хабаровск

| Показатели | № 1 | № 2 | № 3 | № 5 |
|------------------------|-------|-------|---------|-------|
| НУ, мг/кг | 4560 | 2120 | 830 | 400 |
| ОЧГ, млн КОЕ/г | 47.0 | 33.0 | 41.4 | 27,0 |
| НОБ, млн КОЕ/г | 5.9 | 5.8 | 100 | 9.4 |
| НОБ/ОЧГ, % | 12.6 | 17.7 | >100 | 34.8 |
| Сумма пигментов, мг/кг | 26.37 | 21.65 | Не опр. | 17.34 |
| Хл «а», мг/кг | 3.01 | 1.37 | Не опр. | 1.38 |

Суммарное содержание фитопигментов в приповерхностном слое почвогрунтов составляло 17.34-26.37 мг/кг. Величина отношения каротиноидов и хлорофилла «а» составляет > 2 (кар/хл «а» =6.8-9.9), что свидетельствует о том, что микроводоросли в нефтезагрязненных почвогрунтах находятся в неактивном состоянии.

Вертикальное распределение НУ и ЛОС определяли на примере песчано-галечных грунтов. Установлено, что массовая доля НУ снижалась с 830 мг/кг в приповерхностном слое до 560 мг/кг в слое 20-50 см. Соответственно уменьшались величины УЭП и рН почвенной водной вытяжки, а также численность НОБ и ОЧГ. При этом доля НОБ в микробном сообществе значительно понижалась и составляла 6.9%. Распределение ЛОС между слоями почвогрунта было неравномерным. В нижнем слое 20-50 см уменьшалось содержание гексана, ацетальдегида, *n*-ксилола, пропанола. Одновременно в нем увеличивалось количество бензола в 24, бутилацетата в 25, изобутанола в 17, *m*-ксилола в 11, *o*-ксилола в 2 раза, а метанола в 8 раз, при этом содержание последнего достигало максимального значения из всех определяемых компонентов – 17.4 мг/кг.

Выводы

Таким образом, распределение НУ и биотических компонентов (фитопигментов, гетеротрофных бактерий) зависит от морфологических и структурных особенностей почвогрунтов. Распределение кислородосодержащих ЛОС в песчано-гравийном грунте свидетельствует о протекании процессов окислительной деструкции НУ в слое 0-50 см. Этому способствует рыхлая структура песчано-галечного грунта, обеспечивающая достаточную аэрацию по вертикальному профилю грунта.

Литература

Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Лифшиц С.Х., Чалая О.Н. (2016) Формирование поверхностных углеводородных полей техногенного генезиса на территориях объектов нефтегазового комплекса. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России*. Мат-лы Всеросс. научн.-практич. конференции. Якутск: СВФУ. С. 321-325.

Пиковский Ю.И. (1993) Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: МГУ. 208 с.

Нетрусова А.И. (2005) Практикум по микробиологии: Учебн. пособие для студ. высш. учеб. Заведений. М.: Академия. 608 с.

Сигарева Л.Е. (2012) Хлорофилл в донных отложениях Волжских водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК. 217 с.



МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Горбов С.Н.¹, Абросимов К.Н.², Безуглова О.С.¹, Скворцова Е.Б.², Тагивердиев С.С.¹

¹Южный федеральный университет
sngorbov@sfedu.ru; osbesuglova@sfedu.ru; stagiverdiev@sfedu.ru

²Почвенный институт им.В.В. Докучаева
kv2@bk.ru; eskvora@mail.ru

MICROTOMOGRAPHY RESEARCH OF PHYSICAL PROPERTIES OF URBAN SOIL

Gorbov S.N.², Abrosimov K.N.¹, Bezuglova O.S.², Skvortsova E.B.¹, Tagiverdiev S. S.²

¹The Southern federal university, Rostov-on-Don, Russia

²V.V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russia

Annotation: Physical properties and their dynamics under anthropogenic impact are important for the rational use of urban soil and its fertility management. However, standard methods and procedures are hardly usable for the modern urban soil science. New methods from other areas of knowledge, such as computer microtomography widely used in geology, biology, and medicine, need to be searched and adapted.

Введение

Сведения о физических свойствах почвы, их изменении при антропогенных воздействиях являются условием для организации рационального использования почв городских территорий. На современном этапе развития урбопочвоведения применение в ходе подобных изысканий общепринятых в почвоведении методик связано с рядом трудностей. Следовательно, поиск дополнительных методов исследования весьма актуален, адаптировав их к изучению урбостратоземов и урбистратифицированных почв, можно получить более объективные результаты (Горбов и др., 2016).

В качестве нового направления в изучении городских почв выбран метод компьютерной рентгеновской томографии – анализ, не повреждающий внутреннюю структуру твердых объектов, позволяющий получить в процессе съемки и реконструкции ее цифровую копию с сохранением внутренних пропорций и размеров. Компьютерная обработка томографических проекций позволяет с высокой точностью построить объемную цифровую копию внутренней структуры исследуемого объекта, а также рассчитать морфометрические параметры для каждой из видимых рентген-контрастных фаз. Метод компьютерной томографии применим для исследования внутренней структуры большинства естественных и искусственных твердых тел (горные породы, почвы, (Gerke et al., 2012)). В зависимости от возможностей приборов томографическое исследование можно проводить с разным разрешением – от сотен нанометров до долей миллиметра.

Объекты и методы

Объекты настоящего исследования – естественные и антропогенно-преобразованные почвы Ростовской агломерации, подвергающиеся трансформации в условиях урбопедогенеза. Ростовская агломерация одна из крупнейших на юге России, имеет ярко выраженные моноцентрические признаки.

Для характеристики физических свойств мы использовали линейку гумусово-аккумулятивных горизонтов А, отобранных из 20 почвенных профилей, которые в зависимости от условий землепользования и, соответственно, уровня трансформации их морфологических признаков были объединены в следующие группы:



Первая группа. Дневные гумусово-аккумулятивные горизонты почв естественного сложения, существенно не затронутые процессами урбанизации. Представлены черноземами миграционно-сегрегационными (Calcic Chernozem (Hyperhumic, Loamic) по WRB, 2007), сохранившимися на плакорных пространствах в парково-рекреационной зоне города и на входящих или прилегающих к городской черте залежных участках.

Вторая группа. Погребенные гумусово-аккумулятивные горизонты антропогенно-преобразованных почв, перекрытых асфальтовым и/или другим водонепроницаемым покрытием. Типы почв представлены экранированными урбостратоземами (Прокофьева и др., 2014) или Urbic Technosol (Molic, Loamic) по WRB, 2007 и экранированными урбистратифицированными черноземами (Прокофьева и др., 2014) или Calcic Chernozem Novic (Technic, Loamic) по WRB, 2007. В своем “теле” под слоем асфальта экранированные городские почвы сохраняют полнопрофильные черноземы и присущие им основные генетические гумусово-аккумулятивные горизонты. Данный тип почв приурочен к новым жилым районам новостроек, но встречается и в центральной части города.

Третья группа. В качестве условного эталона сравнения был выбран гумусово-аккумулятивный горизонт чернозема, по классификации почв России (2004) – чернозем миграционно-сегрегационный, по классификации WRB – Calcic Chernozem (Hyperhumic, Loamic). Разрез был заложен на территории Персиановской заповедной степи, расположенной в 52 км северо-восточнее г. Ростова-на-Дону. Заповедник представляет собой уникальный массив Приазовской плакорной степи.

Томографические исследования внутренней структуры городских черноземов проведены в почвенном институте им. В.В. Докучаева с использованием рентгеновского микротомографа SkyScan 1172G при энергии рентгеновской трубки 100 keV и разрешении съемки 16 μm . Выбранное разрешение позволяет уверенно детектировать поры-коллекторы, участвующие в фильтрации жидкой воды (крупнее 32 μm) и частицы твердой фазы аналогичных размеров в микромонолитах (рис.1)



Рис. 1. Пробоотбор почвы для томографического исследования.

Обработка томографических данных (теневых проекций) и получение томографических срезов (реконструкция) осуществлено при помощи фирменного программного обеспечения nRecon (Bruker, SkyScan) (SkyScan, 2016). В течение реконструкции интенсивность излучения на исходных рентгенограммах переводится в КТ плотность, разрешение которой зависит от компьютерной системы, выполняющей реконструкцию (Cullity, Stock, 2001).



Результаты и обсуждение

Результаты показали, что независимо от направления антропогенного преобразования гумусово-аккумулятивные горизонты городских почв сохраняют некоторые схожие признаки, характеризующиеся наличием сферических пустых или заполненных обломочным материалом макропор, а также вытянутых ходов корней, преимущественно вертикальной ориентации. Диаметр видимых при томографическом исследовании макропор увеличивается в ряду урбостратозем – чернозем урбистратифицированный – чернозем залежных территорий – чернозем целины – чернозем лесопарка (таблица 1).

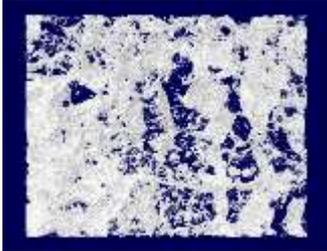
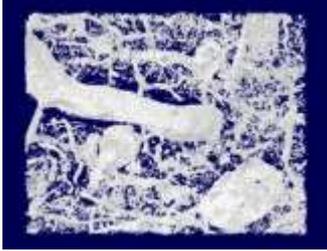
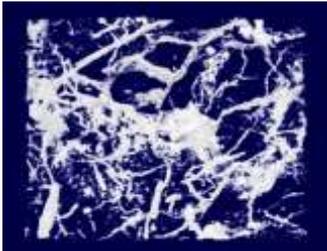
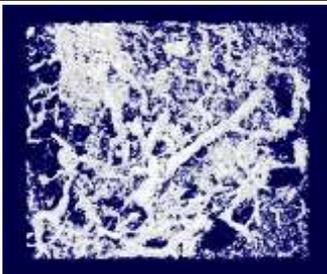
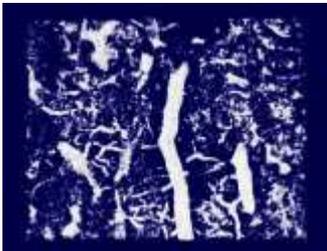
Верхние горизонты черноземов лесопарков по данным томографического сканирования ближе всего к черноземам целинных участков пригорода. Это и многопорядковая агрегированность материала и обширная сеть трещиновидных разветвленных пор произвольной ориентации с раскрытостью от 0,6 до 1,0 мм. Диаметр агрегатов варьирует от 0,2 до 5 мм. Минимальные величины общей и открытой видимой на томографических срезах пористости (8,02% и 3,10% соответственно) характерны для экранированных гумусово-аккумулятивных горизонтов урбостратозема и чернозема урбистратифицированного. Максимальные значения по данному показателю: 27,58% – общая видимая пористость и 26,6% – открытая видимая пористость, – зафиксированы в горизонте АU чернозёма миграционно-сегрегационного лесопарковой зоны города. Однако и в этой почве, отличающейся повышенным содержанием органического вещества (7–8%), значения пористости ниже общей объемной пористости, определяемой традиционными физическими методами, так как на томографе измерению подлежат только те поры, размер которых превышает расширение томографического изображения.

Томографическая съемка наглядно иллюстрирует четкую индивидуальность погребенных гумусово-аккумулятивных горизонтов, отличающихся от таковых остальных почв низкой агрегированностью и монолитностью материала. Практически все запечатанные под асфальтом почвы уплотнены или сильно уплотнены (Прокофьева, 2014). Этот факт подтверждают объемные морфометрические показатели: для антропогенно-преобразованных почв они значительно отличаются в худшую сторону. Как правило, процессу запечатывания чернозема предшествует период повышенного трафика, в результате чего наиболее нарушенная структура выявлена именно у горизонта А экранированного урбостратозема. Наблюдаются явные признаки переуплотнения, сниженная по сравнению с лесопарковыми и целинными черноземами пористость. Поровое пространство фрагментировано, представлено в основном ходами корней. Связанность пор в единую сеть намного ниже естественной, что указывает на плохие дренажные свойства данной почвы и нарушения её экологических функций, что предопределено мощностью погребяющей толщи горизонтов урбик, превышающей 40 см.

Погребенный гумусово-аккумулятивный горизонт урбистратифицированного чернозема экранированного, несмотря на высокую плотность (до 1,8 г/см³) по многим показателям далек от урбостратозема и гораздо ближе к залежным черноземам (г. Ростов-на-Дону, Ботанический Сад). Нарушенность зернистой структуры заметно меньше, поровое пространство представлено множеством пор разнообразной формы, связанность достигает 87%, что незначительно меньше показателя для целинного чернозема. Но есть заметные отличия от залежных и целинных черноземов – повышенная закрытая пористость, множество мелких закрытых пор и самая большая из всех образцов площадь поверхности твердой фазы. Все это может указывать на значительное содержание песка в образце, или на неоднократное занесение песка извне (Abrosimov, 2017).



Таблица 1 – Объемные морфометрические показатели поверхностных и погребенных гумусово-аккумулятивных горизонтов AU, AJ городских почв

| Почвы | Объемная модель фрагмента порового пространства | Пористость общая, % | Пористость открытая, % | Пористость закрытая, % | Связанность порового пространства, % |
|--|---|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Чернозем миграционно-сегрегационный, лесопарк, г. Ростов-на-Дону, р.1203 |  | 27,58 | 26,6 | 1,35 | 97,17 |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, целина, пос. Персиановский, р.1406 |  | 23,01 | 21,46 | 1,97 | 94,72 |
| Чернозем миграционно-сегрегационный, залежь, г. Ростов-на-Дону, Ботсад, р.1403 |  | 13,99 | 12,23 | 2,00 | 88,69 |
| Экранированный урбистратифицированный чернозем миграционно-сегрегационный, селитебная зона, г. Ростов-на-Дону, р.1401 |  | 17,76 | 15,19 | 3,03 | 87,29 |
| Экранированный урбостратозем на погребенном черноземе миграционно-сегрегационном, селитебная зона, г. Ростов-на-Дону, р.1405 |  | 8,02 | 5,08 | 3,10 | 58,61 |

Залежные черноземы по результатам исследования оказались с крайне разнообразной структурой. Чернозем миграционно-сегрегационный по показателям близок к ненарушенным целинным и лесопарковым почвам, но визуально на срезе видны различия. Естественная структура сохранена частично, часть объема занята уплотненными структурами с низкой



пористостью, но с высокой трещиноватостью. Гумусово-аккумулятивный горизонт залежных участков отличается обилием однопорядковых агрегатов и их агломератов, разделенных тонкими трещиновидными порами. В почве также распространены крупные биогенные пустоты различной формы диаметром до 1 см.

Выводы

Микротомографический метод позволяет получить сведения о параметрах порового пространства – физической характеристике почв, которая традиционными методами не исследуется. Информация о поровом пространстве особенно актуальна для почв, испытывающих повышенные нагрузки, в которых присутствуют антропогенные включения, существенно изменяющие физические свойства. Важным диагностическим показателем структурного состояния почвы является величина закрытой пористости.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках Инициативного научного проекта базовой части государственного задания Минобрнауки России (шифр 6.6222.2017/8.9) и при государственной поддержке ведущей научной школы РФ (НШ-3464.2018.11) с использованием приборов Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Литература

Горбов С.Н., Безуглова О.С., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Тагивердиев С.С., Морозов И.В. (2016) Физические свойства почв Ростовской агломерации. Почвоведение. № 8, 964–974.

Классификация и диагностика почв России (2004) Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 342 с.

Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. (2014) Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России. Почвоведение. № 10, 1155-1164.

Abrosimov K.N., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Skvortsova E.B., Romanenko K.A. (2017) The experience of using tomographic methods for study of city soil properties. SUITMA 9. 9th international congress Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas. “Urbanization: a challenge and an opportunity for soil functions and ecosystem services” Russia Moscow 22-26 May 2017. RUDN University Moscow, 232–233.

Gerke K.M., Skvortsova E.B., Korost D.V. (2012). Tomographic method of studying soil pore space: Current perspectives and results for some Russian soils. Eurasian Soil Science. T. 45. № 7, С. 700-709.

Cullity, B.D. and S.R. Stock (2001) Elements of X-ray Diffraction. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

IUSS Working Group WRB. World References Base for Soil Resources 2006. First update 2007, World Soil Resources Reports, 103, FAO, Rome.

SkyScan NRecon User Guide (2016).



УДК 631.48: 445

ЭКОЛОГО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Донерьян Л.Г.¹, Водянова М.А.¹, Воронина Л.П.^{1,2}, Ушакова О.В.¹

¹ФГБУ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва

dlg54@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Luydmila.voronina@gmail.com

ECOLOGICAL-HYGIENIC ASSESSMENT OF THE ANTI-ICING AGENTS' INFLUENCING ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF URBAN SOILS

Donerian L.G.¹, Vodyanova M.A.¹, Voronina L.P.^{1,2}, Ushakova O.V.¹

¹Center for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Moscow, Russian Federation

²Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: В почве депонируется основная масса противогололедных материалов, которые в высоких концентрациях (до 100-150 г/м²) используются в зимний период в г. Москве. Увеличение минерализации почв за счет солевых растворов (преимущественно, NaCl) ведет к процессам засоления и осолонцевания городских почв. Происходят существенные изменения физико-химических свойств почв.

Введение

Применение противогололедных материалов (ПГМ) в зимний период на автомагистралях, тротуарах и во дворах жилых кварталов крупных городов и городских агломераций сопровождается негативными экологическими последствиями. Используемые реагенты отрицательно влияют на химический состав почв, повреждают городские посадки и приводят к коррозии металлических предметов, к разрушению исторических памятников и объектов архитектуры, наносят вред здоровью людей [Касимов и др., 2016; Смагин, 2010]. Статистические исследования доказывают взаимосвязь применения ПГМ с рядом индикаторных заболеваний и, прежде всего болезнью органов дыхания (бронхиальная астма и аллергический ринит). Отмечено, что в 2014 г. в г. Москве выросла заболеваемость аллергическим ринитом среди детей в возрасте от 0 до 14 лет на 27% по сравнению с 2013 г., и в 2015 г. – еще на 17% по сравнению с 2014 г., также отмечен рост заболеваемости бронхиальной астмой [Водянова и др., 2018]. ПГМ, в составе которых твердый NaCl составляет 75–80%, экологически не безопасны, негативные последствия их весьма ощутимы и вызывают справедливые возражения жителей городов.

Вследствие этого необходимо проводить периодические исследования по экологической оценке объектов окружающей среды, контактирующих с ПГМ. При этом, поиск наиболее чувствительных экспрессных методов контроля их негативного действия будет способствовать ограничению их нерационального использования, что поможет определить оптимальные условия применения ПГМ.

Цель работы – оценить возможные экологические особенности функционирования почв при воздействии ПГМ, определить изменения по ряду гигиенических характеристик, свидетельствующих о последствиях их действия.



Негативное влияние на произрастающие в городе растения может быть оценено в опыте по изучению миграции реагента в корнеобитаемом слое почвы.

Объекты и методы

Объектами изучения в данной работе являются атмосферный воздух, снеговые пробы, вода со снегоплавильных пунктов, почва.

Отдельным этапом исследований является оценка процессов трансформации городских почв, испытывающих воздействие реагентов.

Пробы почвы отбирались в начале вегетационного периода (май 2017 года) из поверхностного органоминерального, насыпного, перемешенного горизонта (0-20 см).

Определение почвы осуществляли в соответствии с классификационной системой (на основе диагностического горизонта), что подтверждает наличие среди встречаемых почв основных их типов: с горизонтом «урбик» (UR), техногенным горизонтом (ТСН) и рекультивационным компостно-гумусным (РАТ) или рекультивационным торфяным горизонтом – RT [Прокофьева и др., 2014].

В качестве фоновой почвы использовали наиболее распространенную в регионе дерново-подзолистую среднесуглинистую почву, отобранную в Солнечногорском районе Московской области (Чашниково), не подверженную антропогенному воздействию солевых противогололедных средств.

Физико-химическая характеристика почвы

В образцах почв определяли рН водной суспензии, катионно-анионный состав водной вытяжки по ГОСТам - ГОСТ 26423-85; 26424-85; 26425-85; 26426-85; 26427-85 и 26428-85. Кроме того, исследования были дополнены определением состава легкорастворимых солей в вытяжках из водонасыщенных почвенных паст, которые в большей степени отражают состав жидкой фазы почв (почвенного раствора) и запасов легкорастворимых солей. Учитывая их высокую мобилизацию в течение вегетационного периода, они необходимы для оценки актуального засоления [Субботина М.Г., Батье-Салес Хорхе, 2013; Азовцева Н.А., Смагин А.В., 2018; Малышева А.Г. и др., 2018].

Для основных ионов были рассчитаны коэффициенты накопления в почвах:

$$K_c = C_{гор} / C_{фон},$$

где $C_{гор}$, $C_{фон}$ - среднее содержание элемента в городской и фоновой пробах, соответственно.

Устанавливали суммарный показатель загрязнения почвенного покрова химическими элементами:

$$(Z_c): Z_c = \sum K_c - (n-1).$$

Миграционный эксперимент

Для изучения процесса миграции солевого раствора следующего состава (массовая доля, %): $(NH_2)_2CO$ – 53-63, $Mg(NO_3)_2$ – 38-40, NH_4NO_3 – 1,5, ПАВ (ОП7) – 0,5, использовались специальные миграционные колонки со слоем почвы 25 см и внутренним диаметром 9 см. Твердый ПГМ вносился на поверхность льда (ледовая пластина, толщиной 5 мм) в количестве, равном максимальной и средней норме расхода, определенными в ОДМ №ОС-548-р: 200 и 95 г/м², соответственно. Полив колонок проводился из расчета 3-х месячной нормы осадков (150 мм). Фильтрат отбирался последовательно (каждые 100 мл).

Экотоксикологическая оценка фильтратов, полученных в результате миграции водных растворов ПГМ через слой почвы в колонках, была проведена с помощью батареи тест-культур, в том числе с помощью фитотестирования. Оценка фитотоксических свойств фильтратов проводилась экспресс-методом на проращивание семян тест-культуры пшеницы



мягкой (*Triticum vulgare*), основываясь на рекомендациях действующего метода по обоснованию класса опасности отходов по МР 2.1.7.2297-07.

Результаты и обсуждение

Характер химических изменений городских почв

Максимальное содержание солей наблюдалось в поверхностном слое почв вблизи автодорог, где плотный остаток достигал 0,19%, а такие концентрации солей (плотный остаток 0,2-0,4%) являются пределом для роста и развития произрастающей вдоль дорог растительности.

Установленная сумма солей – 130,6 смоль(экв)/кг – соответствует средней степени засоления. Содержание ионов хлора превысило фоновые концентрации в 9 раз и более, а ионов натрия – в 43 раз, и составило 32,6 и 6,7 смоль(экв)/кг, соответственно. Тип засоления хлоридно-натриевый.

Оценка фитотоксических свойств водных фильтратов

По результатам эксперимента показано, что интенсивность вымывания солей из верхнего слоя почвы выше при максимальной нагрузке ПГМ. Обнаружено полное угнетение роста семян тест-культуры в фильтратах первого и второго отборов. В фильтрате третьего отбора фитотоксический эффект отсутствует.

Влияние ПГМ при внесении средней нормы расхода не оказывало негативного воздействия на проращивание семян как в фоновой, так и в городской почвах.

Динамика угнетения роста корней проростков *Triticum vulgare* представлена в виде показателей фитотоксического эффекта на рисунке 1.

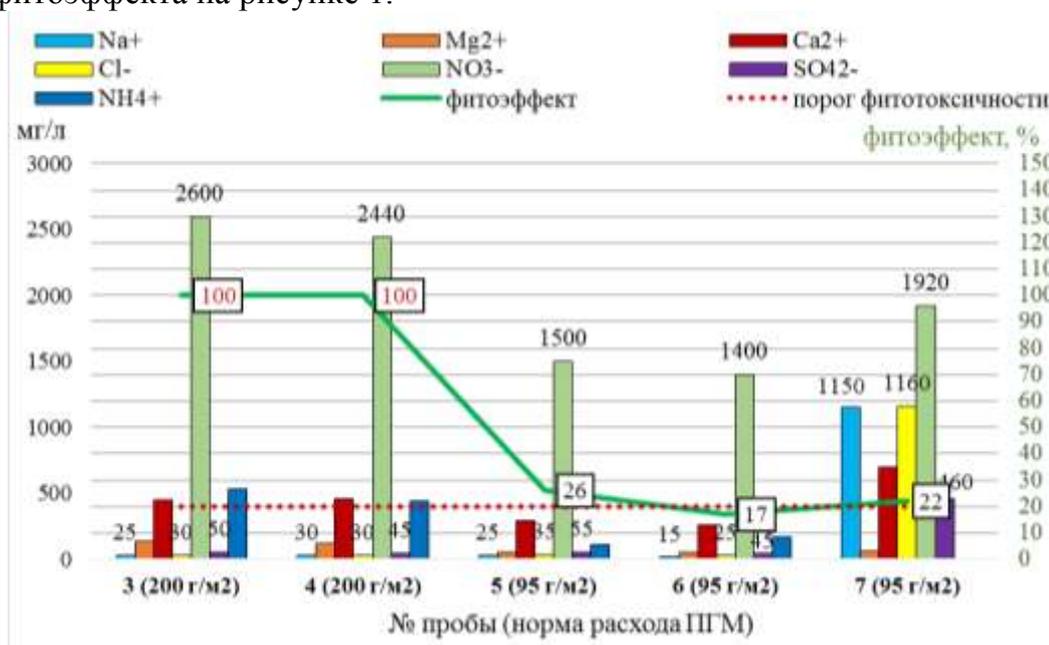


Рис. 1. Зависимость фитотоксического эффекта (%) от нормы внесения ПГМ и катионно-анионного состава водных фильтратов

Выводы

Мониторинг по ряду химических показателей (рН, минерализация и др.), осуществляемый в зимний период по анализу снежного покрова и в весенне-летний период по анализу почвы, обеспечивает выявление аномалий техногенных солей в почвенном покрове, что свидетельствует об антропогенном засолении городских почв.



В обследованных почвах города, особенно в транспортной зоне (вдоль дорог и магистралей города, вблизи остановок транспорта) установлены высокие концентрации хлорида натрия.

Ежегодное депонирование солей в почвах ведет к наличию признаков антропогенной солонцеватости почв (высокие концентрации обменного натрия в почвенном поглощающем комплексе (ППК)).

Тест на проращивание семян свидетельствует о высокой фитотоксической активности исследуемого вида ПГМ, которую следует ожидать при попадании компонентов ПГМ в почву в количестве, которое превышает среднюю норму расхода 95 г/м².

Следует также заметить, что в эксперименте не наблюдалось зависимости между фитотоксичностью водного фильтрата и типом почвы, на котором изучалась миграция ПГМ в почвенных колонках. Поскольку в фильтратах (№№5,6,7) обнаруживались близкие показатели фитоэффекта, следует предположить, что в процессе миграции нитратных солей в верхнем слое дерново-подзолистой почвы, как и в слое техногенно-преобразованной почвы в водный фильтрат вымываются компоненты солей, которые обуславливают наблюдаемый фитоэффект.

Одновременно с этим, показано, что фитотоксичность не зависела от концентрации содержащихся в водных фильтратах обнаруженных катионов и анионов (Na⁺, Ca²⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻).

Благодарность

Исследование проведено в рамках Государственного задания на 2018-2020 гг. по теме: «Оценка риска воздействия противогололедных материалов на здоровье человека и объекты окружающей среды при их применении на урбанизированных территориях» в ФГБУ «ЦСП» Минздрава России.

Литература

1. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. (2016) Геохимия ландшафтов восточной Москвы. – М. 276 с.
2. Смагин А.В. (2010) Городские почвы/ *Urban soils. Nature (Russian)*. 7.15 – 23.
3. Водянова М.А., Евсеева И.С., Вальцева Е.А., Мешков Н.А., Ушакова О.В., Крятов И.А., Матвеева И.С. (2018) Изучение заболеваемости населения города Москвы с целью оценки вероятности последствий применения противогололедных материалов// Современные проблемы оценки, прогноза и управления экологическими рисками здоровью населения и окружающей среды, пути их рационального решения. *Материалы III Международного форума Научного совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды*. – М. 472 с.
4. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. (2014) Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // *Journal of Soil Science*. 10, 1155–1164.
5. Субботина М.Г., Батье-Салес Хорхе. Об электропроводности почв в современных исследованиях // *Пермский аграрный вестник*. 2013. 3(3): 28-33.
6. Азовцева Н.А., Смагин А.В. (2018) Динамика физических и физико-химических свойств городских почв при использовании солевых противогололедных средств. *Journal of Soil Science*. 1, 118-128.
7. Малышева А.Г., Шелепова О.В., Водянова М.А., Донерьян Л.Г., Ушакова О.В., Юдин С.М. (2018) Эколого-гигиенические проблемы применения противогололедных реагентов в условиях крупного мегаполиса (на примере территории г. Москвы) // *Гигиена и санитария*. – М., №11. Т.97. С.1032-1037.



УДК 579.26

ВЛИЯНИЕ ПАВОДКОВ НА ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ ЛУГОВЫХ ПОЧВ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Имранова Е.Л., Кириенко О.А., Харитонов Г.В.

ИВЭП ДВО РАН, Хабаровск, Российская Федерация

micro@ivep.as.khb.ru

THE IMPACT OF FLOOD ON SELF-PURIFICATION OF MEADOW SOILS CONTAMINATED BY
PETROLEUM

Imranova E.L., Kirienko O.A., Kharitonova G.V.

IVEP FEB RAS, Khabarovsk, Russia

Annotation: Microbiological processes in meadow gley soil polluted with oil products before and after the catastrophic flood of 2013 were investigated. Self-purification of contaminated soil is activated due to receipt of fresh organic matter at flooding.

Введение

Проблема нарушения земель под влиянием нефтяного загрязнения является чрезвычайно важной. Поступая в почву, углеводороды могут привести к нарушению экологического равновесия.

В почвах каждой климатической зоны формируется микробиоценоз, обладающий различной активностью трансформации нефти и нефтепродуктов. Поэтому единого показателя нефтяного загрязнения почв не существует (Пиковский, 2003; Яковлева, 2009). Для каждого типа почв необходимо выявить верхний допустимый уровень содержания углеводородов с учетом природных механизмов самоочищения.

Луговые почвы являются наиболее типичными для поймы р. Амур. Вследствие слабо развитого органогенного горизонта они становятся уязвимыми при различных видах внешнего воздействия. В результате катастрофического наводнения 2013 г. луговые почвы поймы длительное время находились в зоне затопления, что привело к морфологическим и структурным преобразованиям микробных комплексов и к изменению скорости и направленности деструкционных процессов.

Целью настоящей работы являются исследования микробиологических процессов в загрязненной нефтепродуктами лугово-глеевой почве до и после катастрофического паводка 2013 года.

Объекты и методы

Объектом изучения была лугово-глеевая почва поймы реки Амур. Образцы почв были отобраны до и после катастрофического наводнения 2013 г. Отобранные после наводнения почвенные образцы использовали в модельном эксперименте загрязнения почв нефтью и керосином. Образцы инкубировали при комнатной температуре и влажности почвы – 60% от полной влагоемкости. Керосин и нефть вносили в количестве 1 г, 2 г, 10 г, 50 г на кг почвы: варианты опыта К1, К2, К10, К50 и Н1, Н2, Н10, Н50 соответственно. Контролем служила почва без нефтепродуктов. Изучали в динамике развитие гетеротрофных бактерий, бактерий-минерализаторов, микромицетов, актиномицетов и нефтеокисляющих бактерий в течение 120 дней. Микробиологические анализы проводили раз в месяц. Для сравнения такой же эксперимент был поставлен с почвой до затопления.



Содержание остаточной нефти и нефтепродуктов в почвенных образцах определяли методом ИК-спектрофотометрии с экстракцией в четыреххлористом углероде (ЧХУ) на приборе КН-2М (Сибэкоприбор, Россия). Хроматографический анализ экстрактов проводили на газовом хроматографе Кристалл 5000.1 (Хроматек, Россия). Анализ проб проведен в ЦКП «Межрегиональный центр экологического мониторинга гидроузлов» при ИВЭП ДВО РАН.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что микробиоценоз органогенного горизонта луговой почвы после затопления проявлял высокую активность в разложении органического вещества, включая углеводороды керосина и нефти. Количество микромицетов в почве увеличилось во всех вариантах через месяц эксперимента. Известно, что актиномицеты очень чувствительны к загрязнению. Представители этой физиологической группы практически не выделялись на средах при посевах или вырастали единичные колонии. Нефть и керосин в концентрации 10 г/кг и 50 г/кг полностью подавляли рост актиномицетов. В почве после затопления их активность была незначительна, но все же выше, чем до наводнения (Имранова, Кириенко, 2015).

Керосин и нефть с концентрацией в пределах от 1 г/кг до 10 г/кг стимулировали жизнедеятельность микромицетов, гетеротрофных и нефтеокисляющих бактерий. Активность исследуемых физиологических групп, а также разложение нефтепродуктов, в целом, была выше в почве, подвергнутой затоплению, что связано с привнесением аллохтонного органического вещества во время паводка (Фахрутдинов, 2005). Более характерная картина наблюдалась в отношении нефтеокисляющих бактерий, являющихся показателями интенсивных процессов окисления нефтепродуктов. Их численность на протяжении всего опыта была выше после паводка, чем до наводнения и нарастала с увеличением концентрации нефти и керосина от 1 г/кг до 50 г/кг. Особенно высокая активность этой группы наблюдалась в почве, загрязненной керосином. Скорость и процент разложения керосина в вариантах К1 и К2 (1 г/кг и 2 г/кг) в паводковом году были выше, чем до затопления, а разложение нефти увеличилось во всех вариантах.

Различают два основных механизма деструкции нефти. Первый представляет биохимические реакции детоксикации нефти с участием ферментов. Таким образом происходит окисление гидрофобных ПАУ и превращение их в более низкомолекулярные и растворимые в воде молекулы. Другой механизм, который работает наряду с первым, сводится к процессу аэробного дыхания микроорганизмов, то есть использования ими углеводов в качестве источника энергии. Все нефти содержат большее или меньшее количество н-алканов. Обычно их содержание в нефтях колеблется от 20 до 50%. Изучение состава н-алканов в почвах по комплексу показателей позволяет определить степень биodeградации нефти. Наибольшей трансформации нефть подвергалась в вариантах Н1 и Н2. В этих вариантах значительно увеличилось отношение н-алканов с нечетным числом атомов углерода к н-алканам с четным числом и суммы изоалканов (пристан + фитан) к сумме нормальных алканов ($C_{17} + C_{18}$), которое рассматривается как коэффициент биodeградации.

Внесение нефтепродуктов в почву вызывает стимуляцию роста не только нефтеокисляющих бактерий, но и нефтерезистентных микроорганизмов, которые в процессе адаптации могут использовать углеводородные соединения в качестве единственного источника углерода (Тен Хак Мун, Кириенко, 2011).

Таким образом, структура и активность почвенного микробиоценоза лугово-глеевой почвы зависит, в первую очередь, от содержания органического вещества и концентрации нефтепродуктов. Полученные данные по составу и распределению н-алканов в почве,



загрязненной нефтью, в конце периода экспозиции показывают, что наибольшей трансформации нефть подвергается в варианте Н1 и Н2 (86% и 79%). В результате мощного паводка происходит дополнительный привнос доступного органического вещества, что активизирует микробиологические процессы самоочищения почв от нефтепродуктов. Степень разложения нефти в луговой почве после затопления варьировала от 64% до 86%., керосина – от 91% до 96%.

Литература

Кириенко О.А., Имранова Е.Л. (2015) Влияние углеводов на состав микробного сообщества в луговой глеевой почве. Вестник ДВО РАН №5, 29-34.

Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернявский С.С., Сахаров Г.Н. (2003) Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами. Почвоведение №9, 1132-1140.

Тен Хак Мун, Кириенко О.А. (2011) О создании микробного консорциума для деградации керосина в почве. Мат.межд.науч.конф.,посв.165-летию В.В.Докучаева «Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности» 1-4 марта г. С-Петербург, 200-201.

Фахрутдинов А. И. (2005) Микробиологическая и ферментативная активность почв и грунтов при рекультивации нефтезагрязненных территорий: дис. ...канд.биол.наук: 03.00.07. Сургут, 125 с.

Яковлева Е.В. (2009) Полициклические ароматические углеводороды в системе почва-растение: автореф. дис. ...канд. биол. наук: 03.00.16. Москва, 22 с.



УДК 632.122.2

ВЛИЯНИЕ СОРБЕНТОВ НА СКОРОСТЬ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ И ИХ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Кондрашина В.С., Васильева Г.К.

ФИЦ «Пушинский научный центр биологических исследований РАН» Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия, vsyatsenko@yandex.ru

INFLUENCE OF ADSORBENTS ON BIOREMEDIATION RATE OF PETROLEUM-CONTAMINATED SOILS AND THEIR HYDRO-PHYSICAL PROPERTIES

Kondrashina V.S., Vasilyeva G.K.

Institute of Physical-chemical and Biological Problems in Soil Science, RAS,
Pushchino, Moscow Region, Russia

Annotation: It was shown that various natural adsorbents may accelerate the bioremediation rate of mineral soils contaminated with weathered crude oil and petroleum products. The main mechanism of their influence is connected with the reduction of the soil phyto- and microbiotoxicity as well as to improve of physical properties and structure of the contaminated soils: increase of soil porosity, water holding capacity and decrease of soil hydrophobicity.

Введение

В последние десятилетия одной из главных экологических проблем во всем мире стало загрязнение почв углеводородами нефти (УВН). С проблемой загрязнения почв УВН сталкиваются в местах её добычи, транспортировки, переработки и использования нефтепродуктов. В результате загрязнения УВН ухудшаются физические и водно-физические свойства почв. Почвенные частицы, покрытые нефтяной плёнкой, теряют способность впитывать и удерживать влагу. В результате снижается плодородие почв, замедляются процессы их рекультивации. Нами был разработан метод сорбционной биоремедиации загрязнённых почв, основанный на использовании гранулированного активированного угля, который существенно ускоряет процессы биодеградации деградируемых поллютантов и обеспечивает прочное связывание высоко персистентных загрязнителей (Vasilyeva et al., 1994; 2006; 2010). Целью данных исследований было изучить влияние активированного угля и других натуральных (несинтетических) сорбентов на скорость биоремедиации и изменение водно-физических свойств нефтезагрязнённых почв в процессе их биоремедиации.

Объекты и методы исследований

Эксперименты проводили с образцами трёх типов почв: аллювиально-луговая (АЛ) и серая лесная (Сл), отобранные в Московской обл. (вблизи г. Пушкино), и чернозём южный окультуренный (Чю), отобранный в Саратовской обл. Образцы почвы отбирали из верхнего 20-см слоя и просеивали через 1-см сито. Свойства почв приведены в Таблице 1.

Закладывали 3 серии опытов. Первую серию проводили в условиях вегетационного эксперимента с серой лесной почвой, загрязнённой смесью отработанного моторного масла (ОММ) и выветренного дизельного топлива (ДТ) при исходной концентрации углеводородов нефти (УВН) около 5_{мас.}%. В этой серии изучали влияние натуральных сорбентов 3-х классов: минеральных (цеолит, вермикулит, каолинит, диатомит), углеродистых (АУД, и биочар) и органического (торф, древесные пилки) (минеральные, органические и углеродистые). Сорбенты вносили в дозах 0,2; 0,5; 1; 2 и 5% для выявления их оптимальных доз и основных механизмов действия. Во всех образцах, кроме необрабатываемого контроля, создавали условия для активации аборигенных микроорганизмов-деструкторов (МД) с



помощью обычных агроприёмов: периодическое перемешивание, увлажнение, известкование слабокислой Сл почвы, внесение минеральных удобрений в начале каждого сезона из расчёта суммарно за весь период наблюдений примерно С:N:P:K=40-100:1:0,5:1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых почв

| Тип почв | Гранулометри- ческий состав | рН _в | С _{орг} , % | Содержание доступных биофильных элементов, мг /100г | | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|--|-------------------------------|------------------|
| | | | | ΣN | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| Аллювиально- луговая | супесчаная | 6,7 | 1,4 | 0,8 | 49,5 | 14,0 |
| Серая лесная | суглинистая | 5,8 | 1,7 | 1,1 | 4,6 | 9,4 |
| Чернозём южный | среднесуглинистая | 6,9 | 2,4 | 2,1 | 41,2 | 11,8 |

Эксперименты 2-й и 3-й серий проводили в микрополевых условиях на экспериментальной площадке ИФХиБПП РАН. Почву слоем 10 см помещали в пластиковые сосуды без дна площадью 0,1 м², врытые в землю. Обработку начинали через 5 сут. после поверхностного загрязнения почвы нефтью (S_{масс.}%) для выветривания лёгкой фракции с целью имитации реальных условий ликвидации аварийного разлива. Более детально условия проведения экспериментов описаны в работах (Зиннатшина и др., 2018; Kondrashina et al., 2018).

В многолетнем эксперименте 2-й серии изучали влияние 2-х доз (близких к оптимальным) сорбентов 3-х классов на скорость биоремедиации серой лесной почвы, загрязнённой выветренной сырой нефтью. Сорбенты вносили как индивидуально, так и в комбинации с биопрепаратом «Деворойл».

В эксперименте 2-й серии изучали влияние гранулированного активированного угля (гранулы размером 2-5 мм) марки ГАУ ВСК (г. Дзержинск) и порошкового диатомита Инзенского месторождения, которые вносили вместе (смесь 4:1) или отдельно в дозах 2 и 5%. Сорбенты вносили как индивидуально, так и в комбинации с биопрепаратом «Родер». Сосуды ежегодно засеивали растениями: люцерной посевной (*Medicago sativa*), клевером белым (*Trifolium repens*) или пшеницей яровой (*Triticum durum*). Почву периодически перемешивали и отбирали на анализ, при необходимости поливали отстоянной водопроводной водой. Повторность в опыте 3-х-кратная.

Почву анализировали на суммарное содержание УВН и метаболитов методом ИК-спектрометрии, основанном на экстракции загрязнителей четыреххлористым углеродом с последующей очисткой экстрактов на колонке с окисью алюминия и определении концентрации соединений, содержащих С-Н-связи на ИК-спектрометре (ПНДФ 16.1:2.2.22-98). Изучали также влияние сорбентов на показатели роста фитомелиорантов. Кроме того в конце каждого сезона определяли изменение водно-физических свойств и структуры почв. Для этого определяли предельную полевую влагоёмкость (ППВ), объёмную массу, пористость, коэффициенты фильтрации и структурности, водопроницаемость, водоустойчивость, содержание агрономически ценных агрегатов (АЦА), критерий АФИ с помощью методов и подходов, принятых в классическом почвоведении. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Статистика 10А.

Результаты и обсуждение

Исследуемые почвы существенно различаются по физическим свойствам: в ряду почв АЛ, Сл и Чю - от лёгкой малогумусированной АЛ почвы до среднегумусированного Чю со



среднетяжёлым гранулометрическим составом. В разные сроки отбора показатели ППВ чистых почв колебались в пределах 32-33, 45-49 и 52-59%; пористость - 54-55, 57-59, 63-64%, а объёмная масса – 1,1-1,2; 0,8-1,1 и 0,9-1,0 г/см³, соответственно.

Показано, что во всех почвах под действием нефтяного загрязнения происходит существенное снижение ППВ из-за образования гидрофобной плёнки на поверхности почвенных агрегатов. Это приводит к пересушиванию верхнего слоя почвы и одновременному переувлажнению нижних её слоёв, что ухудшает условия жизнедеятельности микроорганизмов и растений и способствует вымыванию лёгких водорастворимых фракций нефти в грунтовые воды.

В условиях вегетационного эксперимента показано, что внесение натуральных сорбентов разных классов в серую лесную почву, загрязнённую смесью ОММ и выветренного ДТ, может существенно повысить скорость биодegradации углеводов. В присутствии большинства сорбентов повышается влагоёмкость и пористость почв, снижается объёмная масса. В ходе биоремедиации рН почвы колеблется под действием различных процессов: наблюдается подкисление при внесении повышенных доз удобрений и сорбентов (торф, опилки, диатомит) или подщелачивание в присутствии некоторых минеральных сорбентов (цеолит, вермикулит, ГАУ). Однако в большинстве образцов этот показатель поддерживался в интервале, близком к оптимальному для большинства индикаторных растений, включая клевер и пшеницу (рН от 6 до 7). При исходной концентрации УВН около 5% оптимальные дозы минеральных сорбентов колеблются в пределах 0,2-1%, а углеродистых и органических 0,5-2%.

Результаты 3-х-летнего микрополевого эксперимента с серой лесной почвой, загрязнённой выветренной сырой нефтью средней плотности, показали, что внесение оптимальных доз различных натуральных сорбентов может существенно повысить эффективность метода биоремедиации при условии оптимизации дозы вносимых минеральных удобрений (соотношение С:N:P:K=40-100:1:0,5:1) и поддержания рН почвы в пределах 6,0-7,5. Общий механизм действия сорбентов основан на снижении фито- и микроботоксичности почвы за счёт преимущественно обратимой сорбции углеводов и их токсичных метаболитов, повышения влагоёмкости, пористости и влажности почвы, а также снижения её гидрофобности, что создает более благоприятные условия для развития нефтеструктуров (аборигенных и инокулированных) и фиторемелиорантов (рис. 1).

В экспериментах 3-й серии с 3 типами почв наблюдалось некоторое укрупнение почвенных агрегатов вследствие склеивания более мелких частиц под действием нефтяного загрязнения, особенно в почвах более тяжёлого гранулометрического состава (суглинистая Сл и в меньшей степени среднесуглинистая Чю). Это приводило к снижению объёма влагосохраняющих и одновременно увеличению объёма влагопроводящих пор, что также отрицательно сказывается на свойствах почв. В нефтезагрязнённых почвах повышалась водопрочность почвенных агрегатов выше критической нормы.

Наилучшие результаты были получены с использованием смешанного сорбента АУД, в присутствии которого ускорялось микробное разложение углеводов нефти, а также улучшался рост растений фитомелиорантов, хотя определенный эффект давало внесение и индивидуальных сорбентов. Вклад микроорганизмов, вносимых в виде биопрепарата, был незначительным. Во всех исследованных нефтезагрязнённых почвах с добавками сорбентов наблюдалось повышение влагоёмкости и пористости, а также снижение объёмной массы почв. Кроме того в присутствии всех сорбентов наблюдалось существенное повышение скорости впитывания, а также скорости фильтрации, как нефтезагрязнённых, так и контрольных образцов чистых почв (Рис. 2). При этом скорость впитывания очищенных от



нефти Сл и Чю почв была в 2-5 раз выше, чем чистых почв с теми же добавками, хотя скорость впитывания загрязнённой АЛ почвы ещё несколько отставала от образцов чистого контроля. Аналогичные тенденции наблюдаются при определении скорости фильтрации почв.

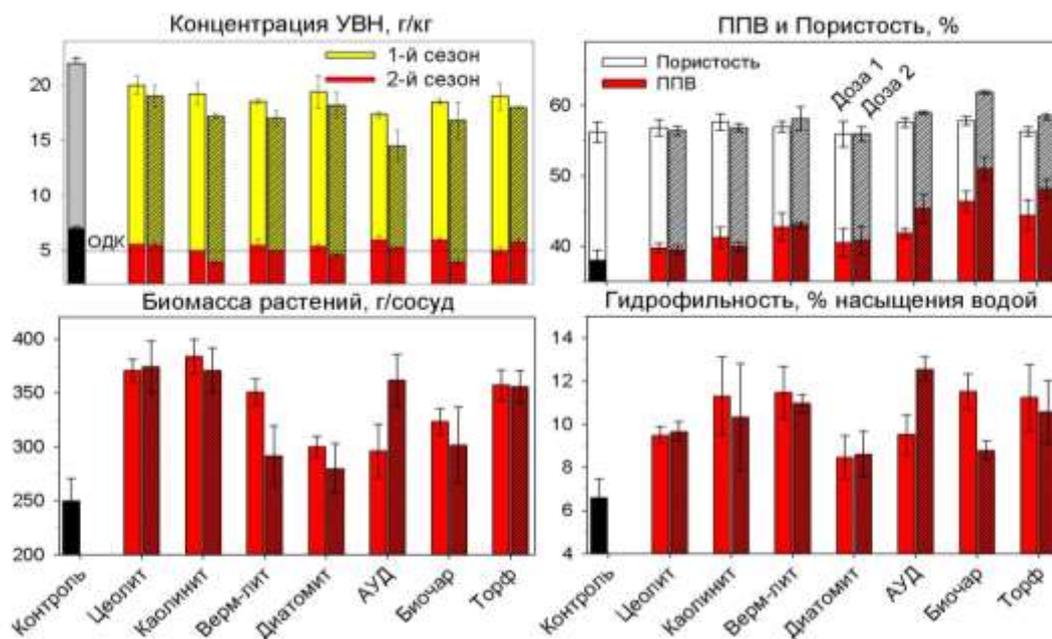


Рис. 1. Влияние 2-х доз сорбентов на остаточную концентрацию УВН в нефтезагрязненной почве в конце 1-го и 2-го сезонов очистки, биомассы растений, ППВ, пористости и гидрофильности почвы, оцененной по степени насыщения образцов водой за 8 мес.

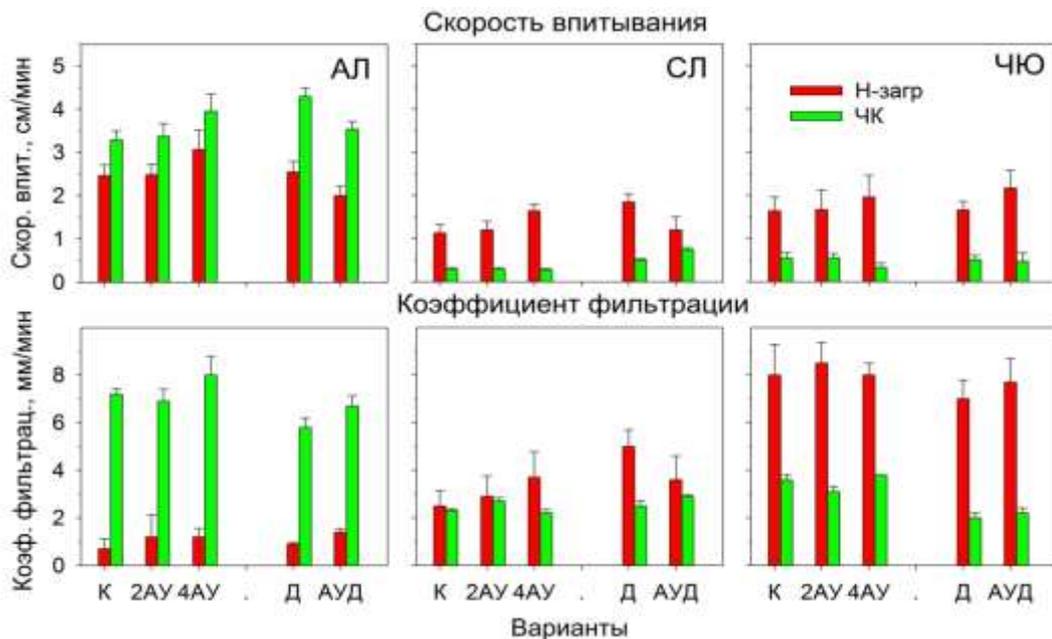


Рис. 2. Влияние сорбентов на скорость впитывания и скорость фильтрации нефтезагрязненной (Н-загр) и контрольных образцов чистой (ЧК) почвы в конце 2-го сезона обработки в присутствии 2 и 4% ГАУ, 0,5% Д и 4,5% смешанного сорбента АУД.

Повышение скоростей впитывания и фильтрации в суглинистых почвах с низким коэффициентом фильтрации является положительным фактором и указывает с одной стороны на улучшение структурированности очищенных от нефти почв Сл и Чю по



сравнению с исходными, а с другой стороны – на повышение гидрофильности почв. Пониженные по сравнению с чистым контролем величины скорости фильтрации и впитывания АЛ почвы свидетельствуют о недостаточной степени очистки к концу 2-го сезона этой менее гумусированной почвы с лёгким гранулометрическим составом. И наоборот, в очищенных Сл и Чю почвах наблюдалось явление структурирования почв, причиной которого могло стать частичное превращение углеводов нефти в гумусоподобные молекулы.

Для выяснения механизмов изменения водно-физических свойств почв в конце 2-го сезона очистки был проведен агрегатный анализ почвенных образцов методами сухого и мокрого просеивания. Установлено, что очищенной от нефти почве сильно изменяется соотношение агрегатов разных фракций по сравнению с чистыми почвами, при этом внесение АУД оказало положительное влияние на агрегатный состав почв и их водопрочность. В присутствии сорбентов в нефтезагрязнённых почвах происходит более быстрое разрушение наименее ценной глыбистой фракции (>10 мм) и частично агрономически ценных агрегатов диаметром 5-10 мм, с последующим формированием агрегатов диаметром 0,25-5 мм. При этом показатели водоустойчивости агрегатов снижаются до нормы. Таким образом, внесение сорбента АУД оказывает положительное влияние на структуру очищенных от нефти почв, что в конечном итоге это создает благоприятные условия для ускоренной биодegradации углеводов нефти.

Заключение

Показано, что различные минеральные сорбенты, внесённые в оптимальных дозах, могут существенно повысить скорость биоремедиации нефтезагрязнённых почв за счёт снижения фито- и микроботоксичности, а также в результате улучшения водно-физических свойств почв и их структуры.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-06-00617

Литература

- Vasilyeva G.K., Surovtseva E.G., Belousov V.S. (1994) Microbial method for the clean-up of soil contaminated with propanil and 3,4-dichloroaniline. *Microbiology*. **63(1)**, 75-80.
- Vasilyeva G.K., Strijakova E.R., Shea P.J. (2006) Use of activated carbon for soil bioremediation. Ch. 4.7 (p.309-322) / In: Viable methods of soil and water pollution monitoring, protection and remediation // I. Twardowska, H.E. Allen and M.H Haggblom, eds. Serial NATO Collection, Netherlands, Springer– 629 p.
- Vasilyeva G.K., Strijakova E.R., Nikolaeva S.N., Lebedev A.T., Shea P.J. (2010) Dynamics of PCB removal and detoxification in historically contaminated soils amended with activated carbon. *Environmental Pollution*. **158(3)**, 770-777.
- Kondrashina V., Strijakova E., Zinnatshina L., Bocharnikova E., Vasilyeva G. (1918). Influence of activated carbon and other additives on bioremediation rate and characteristics of petroleum-contaminated soils. *Soil Science*. **138(4)**, 150-159.
- Зиннатшина Л.В., Стрижакова Е.Р., Даньшина А.В, Васильева Г.К. (2018) Влияние сорбентов на скорость биоремедиации и свойства почвы, загрязненной смесью нефтепродуктов. *Естественные и технические науки*. **9**, 24-30



УДК: 631.4

СОВРЕМЕННОЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА (на примере города Ухта)

Кряжева Е.Ю.¹, Лаптева Е.М.², Боброва Ю.И.²

¹Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Российская Федерация
eremina_83@mail.ru

² Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация
lapteva@ib.komisc.ru

MODERN ECOLOGICAL STATE OF SOILS IN INDUSTRIAL CITIES OF THE EUROPEAN NORTH-
EAST (ON THE EXAMPLE OF UKHTA)

Kryazheva E.Yu.¹, Lapteva E.M.², Bobrova Yu.I.²

¹ Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

² Institute of Biology of Komi SC of the Ural Branch of the RAS, Syktывkar, Russian Federation

Annotation: For the first time a comprehensive environmental assessment of the soils of the city of Ukhta was carried out, the content of 14 heavy metals, arsenic, petroleum products, phenols, the activity of catalase and invertase in different functional areas of the city was determined.

Введение

Европейский Северо-восток России богат сырьевыми ресурсами, в первую очередь, топливно-энергетическими. На этой территории активно ведется их добыча и переработка. Большинство городов в этом суровом по климатическим условиям регионе имеют промышленную специфику, с чем связана в них достаточно напряженная экологическая обстановка. Проблемы оценки экологического состояния урбанизированных территорий промышленного Севера России сегодня крайне актуальны. Своеобразным индикатором качества городской среды являются городские почвы, способные аккумулировать загрязняющие вещества из сопредельных сред. Известно, что самым чувствительным компонентом любой среды является ее биота, по состоянию которой можно оценить состояние всей системы. В настоящее время в почвенном биомониторинге широко используются методы биоиндикации, основанные на оценке активности почвенных ферментов. Как отмечают многие исследователи (Звягинцев, 1991; Хазиев, 2005), при организации экологического мониторинга целесообразно использовать несколько ферментов из разных функциональных групп. Наиболее хорошо изучены ферменты двух классов – оксидоредуктаз и гидролаз (Звягинцев, 1991).

Цель данной работы заключалась в оценке экологического состояния почв города Ухта по содержанию загрязняющих веществ и активности почвенных ферментов (каталаза, инвертаза).

Объекты и методы

Ухта – один из центральных городов Республики Коми, образован в 1929 году как поселок нефтяников, в 1943 году получил статус города. Промышленная специфика Ухты заключается в транспортировке нефти и газа, а также в нефтепереработке. Городская территория в пониженной части Тиманского кряжа, приурочена к долинам рек Ухта и ее притока Чибью. Почвы города Ухта сформированы на насыпных грунтах и представлены



маломощными образованиями (реплантоземами) без четко выраженных горизонтов. Повсеместно присутствие щебнистого материала, используемого для планировки территории. В зеленых зонах города сохранились антропогенно-нарушенные аналоги природных почв преимущественно в виде подзолов и пойменных почв.

Для оценки экологического состояния почв города Ухта в августе 2017 г. были отобраны почвенные образцы. Пробы отбирали в точках, соответствующих разным функциональным зонам города – транспортной, промышленной и рекреационной – всего 20 точек. Отбор проб почв осуществляли в соответствии с ГОСТ и методическими рекомендациями по работе с городскими почвами (ГОСТ 17.4.4.02-84; Федорец, Медведева, 2009; Методические указания по оценке городских почв..., 2003, Теория и практика химического анализа почв..., 2006). Образцы отбирали методом конверта из пяти прикопок с глубины 0–10 и 10–20 см. Анализировали смешанные образцы, пробоподготовку которых проводили в соответствии с общепринятыми методами. Химические показатели почв исследовали в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН в соответствии с ГОСТ (26423-85; 26484-85; 26487-85; 26213-91; ГОСТ Р 54650-2011), ПНД Ф (16.1:2.3:3.50-08; 16.1.:2.3:3.11-98; 16.1:2.23-2000; 16.1:2.21-98) и согласно (ФР.1.31.2016.23499). Каталазную активность почв определяли газометрическим методом (Звягинцев, 1991; Хазиев, 2005), инвертазную активность – фотокolorиметрическим (Звягинцев, 1991; Хазиев, 2005). Статистический анализ полученных данных выполняли в программном пакете Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Анализ химических свойств почв Ухты показал (таблица), что для реплантоземов города характерны нейтральная или слабощелочная реакция среды, очень высокое содержание обменного кальция, среднее и повышенное содержание обменного магния и, в целом, подвижного калия, повышенная и высокая степень насыщенности основаниями. Содержание подвижного фосфора и углерода органического варьирует в очень широких пределах – от очень низкого до очень высокого. Для почв парковых зон характерны слабокислая или близкая к нейтральной реакция среды, а также контраст в значениях изучаемых показателей при переходе от органогенных горизонтов к минеральным (за исключением подвижного фосфора, содержание которого в большинстве точек выше в нижнем горизонте).

Почвенные образцы исследовали на содержание 14 тяжелых металлов (Zn, Cd, Cu, Co, Ni, Fe, Mn, Cr, Mo, V, Sr, Pb, Hg, Ba) и одного тяжелого металлоида (As). Определяли массовую долю валовых и подвижных форм. Согласно полученным данным, содержание валовых форм тяжелых металлов в почвах города Ухта не превышает существующие нормативы ОДК (для нейтральных почв) (ГН 2.1.7.2511-09). Содержание подвижных форм Pb (промышленная зона) и Mn (зона рекреации) незначительно превышает ПДК (ГН 2.1.7.2041-06), на уровне ПДК в почвах промышленной зоны находится среднее содержание подвижных форм Zn. В отдельных точках разных зон установлено превышение норматива по данным элементам: максимально для Pb (в 4 раза) и Zn (в 2,5 раза) в почвах промышленной зоны. При сравнении полученных данных с фоновыми концентрациями (Об установлении нормативов фонового содержания..., 2009), установленными всего для 6 элементов: Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, Pb, выявлено их превышение в верхнем горизонте во всех зонах: максимально для Cu (в среднем по городу – 3,49), минимально для Cd (1,43). Среднее значение суммарного показателя загрязнения (Zc) верхнего слоя почв (Водяницкий, 2010) для города в целом и для отдельных функциональных зон соответствует категории не опасного загрязнения, при этом в промышленной и рекреационной зонах им соответствуют близкие значения, превышающие показатель Zc для транспортной зоны в 1,6 раза.



Таблица. Свойства почв города Ухта

| Показатель | Верхний слой почв (0–10 см) | | | Нижний слой почв (10–20 см) | | |
|--|-----------------------------|-------------|--------|-----------------------------|-------------|--------|
| | $\bar{X} \pm \Delta$ | min – max | V, % | $\bar{X} \pm \Delta$ | min – max | V, % |
| pH (H ₂ O) | 7,48±0,22 | 6,04–7,9 | 6,16 | 7,28±0,56 | 5,46–7,97 | 10,75 |
| pH (KCl) | 7,1±0,27 | 5,34–7,68 | 8,06 | 6,56±0,7 | 4,35–7,41 | 14,94 |
| Ca ²⁺ , ммоль/100 г | 50,3±11,58 | 6,85–112,98 | 49,25 | 41,09±20,81 | 1,37–84,14 | 70,81 |
| Mg ²⁺ , ммоль/100 г | 2,18±0,44 | 0,66–3,87 | 43,1 | 1,75±0,81 | 0,4–4,17 | 64,53 |
| Степень НО *, % | 91,27±6,01 | 56,85–99,81 | 14,08 | 84,76±13,98 | 37,46–99,52 | 23,06 |
| С органический, % | 5,7±2,05 | 0,45–14,16 | 76,78 | 4,84±3,63 | 0,23–12,59 | 104,9 |
| P ₂ O ₅ , мг/100 г | 18,17±10,13 | 0,01–93,4 | 119,28 | 53,63±77,75 | 0,39–357,8 | 202,68 |
| K ₂ O, мг/100 г | 17,56±4,04 | 5,68–37,59 | 49,25 | 9,6±4 | 1,5–20,39 | 58,28 |
| НП **, мг/кг | 620,8±348,3 | 24–3200 | 120 | 224,45±192,37 | 7,2–940 | 119,84 |
| Фенолы, мг/кг | 0,62±0,34 | 0,04–2,8 | 117,68 | 0,49±0,41 | 0,01–1,4 | 117,42 |
| Zc *** | 8,99±2,6 | 0,41–23,16 | 61,94 | 5,3±4,08 | -2,62–19,55 | 107,78 |
| Активность инвертазы **** | 16,41±7,6 | 3,32–69,21 | 98,99 | 3,24±3,76 | 0–14,4 | 162,21 |
| Активность каталазы ***** | 1,8±0,28 | 1–3,18 | 33,28 | 0,83±0,5 | 0,13–2,67 | 83,73 |

Примечание. \bar{X} – среднее арифметическое; $\pm\Delta$ – доверительный интервал для $p=0,95$; min – минимальное значение; max – максимальное значение; V – коэффициент вариации (%).

* – степень насыщенности основаниями,

** – нефтепродукты,

*** – суммарный показатель загрязнения почв тяжелыми металлами (Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, Pb),

**** – мг глюкозы на 1 г почвы за 24 часа,

***** – мл O₂ на 1 г почвы за 1 минуту.

Содержание нефтепродуктов в почвах города Ухта варьирует в значительных пределах (коэффициент вариации более 100 %). Самые высокие концентрации соответствуют верхнему горизонту почв, обследованных в транспортной зоне. В четырех точках (2 – транспортная зона, 1 – промышленная зона, 1 – рекреационная) отмечено превышение допустимого содержания нефтепродуктов в почвах (1000 мг/кг) максимально – в 3,2 раза (транспортная зона), минимально – в 1,12 раза (транспортная зона). Содержание нефтепродуктов превышает фоновый уровень (Об установлении нормативов фонового содержания..., 2009), во всех изученных образцах, минимально – в 1,45 раза, максимально – в 194.

Содержание фенолов в почвах города Ухта также очень сильно варьирует (коэффициент вариации более 100 %), при этом самые высокие концентрации соответствуют органогенному горизонту городского парка и газонам, в почвах которых присутствует внесение свежего торфа.

Активность каталазы в исследованных образцах соответствует бедной и очень бедной степени (Звягинцев, 1991), при этом в верхнем слое почвы активность каталазы выше, а вариация ее значений ниже. Самое высокое значение соответствует органогенному горизонту почвы городского парка, самое низкое – минеральным горизонтам почв рекреационной зоны.

Активность инвертазы в почвах Ухты варьирует от очень бедной степени до богатой (Звягинцев, 1991), при этом в верхнем слое ее активность существенно выше. Самое высокое значение соответствует органогенному горизонту городского парка (богатая), относительно высокие значения (средняя обогащенность) отмечены и в точках других зон – всего 6 точек.



В нижних горизонтах почв рекреационной зоны города активность инвертазы близка к нулевым значениям.

Оценка корреляционных связей между активностью ферментов и содержанием загрязнителей в почвах разных функциональных зон выявила в промышленной зоне высокую положительную степень зависимости между активностью каталазы и Ni (вал. и подв.), Mn (вал. и подв.), Cr (вал. и подв.), Cu (вал. и подв.), Co (подв.), Ba (подв.) и показателем Zc, а также отрицательную связь с pH (KCl); высокую положительную степень корреляции между активностью инвертазы и Mg^{2+} , P_2O_5 , K_2O , C орг., фенолом, а также отрицательную зависимость со степенью насыщенности основаниями. В верхнем горизонте транспортной зоны установлена высокая положительная степень связи активности каталазы с показателем Zc, активности инвертазы с P_2O_5 , K_2O , C орг., Hg, Cd, Zn (вал.), Ba (вал.) и As; в нижнем горизонте – активности каталазы с K_2O , Cu (вал.), Ni (вал. и подв.), Fe (вал. и подв.), Mn (вал. и подв.), Ba (вал. и подв.), показателем Zc; активности инвертазы с Ca^{2+} , Mg^{2+} , K_2O , фенолом, Cr (вал.), Sr. Сильная отрицательная зависимость в нижнем горизонте транспортной зоны выявлена между активностью каталазы и валовым содержанием Zn, между активностью инвертазы и pH (KCl), Pb (вал. и подв.), Cu (подв.). В верхнем горизонте рекреационной зоны установлена сильная положительная корреляция между активностью каталазы и Mg^{2+} , K_2O , фенолом, C орг., Zn (подв.); между активностью инвертазы и K_2O , фенолом, C орг., Zn (подв.); сильная отрицательная связь – между активностью каталазы и pH (KCl), со степенью насыщенности основаниями, Co (подв.); между активностью инвертазы и pH (KCl), со степенью насыщенности основаниями, Co (вал.), As, Zn (подв.). В верхнем горизонте рекреационной зоны активности ферментов положительно коррелируют друг с другом. В нижнем горизонте рекреационной зоны активность инвертазы равна нулю, а активность каталазы положительно связана с Ca^{2+} , C орг., нефтепродуктами, Cd, Cu (подв.), Zn (подв.), Co (подв.), Cr (подв.); отрицательно связана с P_2O_5 .

Выводы

Таким образом, почвы города Ухта по содержанию тяжелых металлов характеризуются как неопасно загрязненные, при этом значения содержания большинства из них выше в промышленной зоне. Тяжелые металлы накапливаются преимущественно в верхнем горизонте почв, за исключением транспортной зоны, где более высокие концентрации соответствуют нижнему слою. Исключением являются нефтепродукты, концентрация которых в транспортной зоне выше в верхнем горизонте почв. Среднее их содержание в почвах транспортной зоны более, чем в два раза больше, чем в промышленной и рекреационной. В некоторых точках отмечен умеренно-опасный и опасный уровень загрязнения почв нефтепродуктами (Пиковский, 1993). Активности изученных ферментов выше в верхних горизонтах почв. Самые большие значения соответствуют органогенному горизонту городского парка. Вариация активности инвертазы существенно больше, чем каталазы. В органогенном горизонте городского парка она максимальна, а в минеральном – равна нулю. Активность каталазы более стабильна, но она незначительна. Между активностями ферментов и содержанием загрязнителей установлены корреляционные связи, как положительные, так и отрицательные, при этом отмечена тенденция большего количества положительных зависимостей между активностью каталазы и содержанием тяжелых металлов в отличие от активности инвертазы, которой в большей степени соответствуют отрицательные связи с содержанием тяжелых металлов в почве. В транспортной зоне отмечена слабая отрицательная корреляция между активностью инвертазы и содержанием нефтепродуктов.



Литература

- Звягинцев Д.Г. (1991) Методы почвенной микробиологии и биохимии / Д.Г. Звягинцев. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- Хазиев Ф.Х. (2005) Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- ГОСТ 17.4.4.02-84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
- Федорец Н.Г., Медведева М.В. (2009) Методика исследования почв урбанизированных территорий. Петрозаводск, 2009. 84 с.
- Методические указания по оценке городских почв при разработке градостроительной и архитектурно-строительной документации. М., 2003. 48 с.
- Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
- ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
- ГОСТ 26484-85 Почвы. Метод определения обменной кислотности.
- ГОСТ 26487-85 Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО.
- ГОСТ Р 54650-2011 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
- ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества (по методу Тюрина в модификации ЦИНАО с фотометрическим окончанием).
- ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08 (ФР.1.31.2008.05186). Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовых долей подвижных форм металлов в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме.
- ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 (ФР.1.31.2006.02149). Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектromетрии с индуктивно-связанной плазмой.
- ПНД Ф 16.1:2.23-2000 (ФР.1.31.2005.01686). Определение содержания ртути в почве, донных отложениях и горных породах.
- ПНД Ф 16.1:2.21-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости "Флюорат-02".
- ФР.1.31.2016.23499. Капиллярная газовая хроматография, Методика измерений № 88-17641-003-2016.
- ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.
- ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
- Об установлении нормативов фонового содержания химических элементов и углеводов в почвах республики Коми. Приказ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми № 529 от 25.11.2009 г.
- Водяницкий Ю.Н. (2010) Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280.
- Пиковский Ю.И. (1993) Природные и техногенные потоки углеводов в окружающей среде. Москва.: Изд-во МГУ, 1993. 209 с.



УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЧВЕННЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЕКРЕАЦИИ

В.А.Кузнецов¹, И.М.Рыжова¹

¹ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В.Ломоносова», Москва, Российская Федерация
xts089@gmail.com

CHANGES IN THE VITAL CONDITIONS OF SOIL INVERTEBRATES UNDER THE INFLUENCE OF
RECREATION

V.A.Kuznetsov¹, I.M.Ryzhova¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation: Under the influence of the recreational load, the abundance, biomass and diversity of soil invertebrates decrease by a factor of 2–2.5. The condition of soil invertebrates is a sensitive indicator, which depends on the conditions of their habitat and is largely due to changes in the characteristics of the litter and soil properties.

Введение

Рекреация влияет не только на растительный покров и свойства почв, но и на состояние комплекса почвенных беспозвоночных. В рекреационных лесах мезопедобионты подвергаются прямому воздействию, которое выражается в основном в их механическом уничтожении и опосредованному – через преобразование их экологических ниш (сокращение жизненного пространства и кормовой базы). Под влиянием рекреации изменяются численность, биомасса и групповой состав почвенных беспозвоночных. В городских лесопарках с увеличением рекреационной нагрузки эти параметры могут меняться до 20 раз от своих исходных значений (Захаров и др., 1989; Грюнталь, 2004).

Целью настоящей работы является оценка изменений условий жизнедеятельности почвенных беспозвоночных под влиянием рекреации.

Объекты и методы

Объекты исследования – почвенные беспозвоночные двух лесопарков г.Москвы: «Лосинового острова» и «Битцевского леса». В лесопарке «Лосиный остров» изучались экосистемы елово-липового леса на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, а в «Битцевском лесу» - дубово-липового леса на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах. В каждой экосистеме было заложено по пять пробных площадей, соответствующих разным уровням рекреационной азонагрузки, определенной по доли площади дорожно-тропиночной сети, характеризующих каждую из пяти стадий рекреационной дигрессии (ОСТ 56-100-95). Почвенные образцы на каждой пробной площади отбирались с учетом пространственной структуры растительного покрова: на тропинках, в прилегающих к ним зонах (на удалении до 100 см) и территории вне прямого влияния тропинок. Фоновыми послужили участки I стадии дигрессии.

Определение характеристик подстилки (тип, запасы, фракционный состав) и свойств почв ($pH_{вод}$, электропроводность, содержание органического углерода, твердость, плотность и агрегатный состав) проводилось по общепринятым методикам (Теория и практика..., 2006; Шеин, 2005). Учет численности, группового состава и биомассы почвенной мезофауны проводился в 3-кратной повторности в подстилке, 0-10 и 10-20 см слоях почвы методом ручной разборки монолитов площадью 1/16 м² (Гиляров, 1975).



Статистический анализ полученных данных осуществлялся в пакете STATISTICA. Анализировались систематические выборки, составленные с учетом неравномерности распределения рекреационной нагрузки на каждой пробной площади.

Результаты и обсуждение

Под влиянием рекреации изменяются тип, запасы и фракционный состав подстилки, а также физические и химические свойства дерново-подзолистых почв. Увеличение рекреационной нагрузки определяет статистически значимое уменьшение запасов подстилки к V стадии дигрессии на 25-33% и увеличение в результате вытаптывания доли ее измельченной фракции в хвойно-широколиственном лесу «Лосинового острова» в 4, а в широколиственном лесу «Битцевского леса» в 7 раз. В верхнем пятисантиметровом минеральном слое почвы твердость возрастает более чем в 2,5 раза, плотность - на 0,21-0,28 г/см³, а доля агрономически ценных агрегатов и коэффициент структурности снижается в 2 и более чем в 4 раза, соответственно. В ряде случаев физические свойства достигают своих критических значений, неблагоприятных для жизнедеятельности живых организмов. Содержание органического углерода за счет вытаптывания подстилки и поступления сажи возрастает с 1,7-2% до 2,9-3,3%. В результате увеличения поступления атмотехногенной пыли и антигололедных реагентов электропроводность увеличивается в 2-3 раза, а кислотность снижается. При переходе на V стадию дигрессии рНвод увеличивается с 4,3 до 5,1 в почвах елово-липового леса «Лосинового острова» и с 5,2 до 5,6 в почвах дубово-липового «Битцевского леса».

Под влиянием усиливающегося рекреационного воздействия изменяется состояние мезопедобионтов, что является следствием преобразования условий их местообитания, во многом обусловленное изменениями в водно-воздушном режиме почв и условиях питания.

В зонах лесопарков, не испытывающих рекреационной нагрузки, плотность и биомасса мезофауны примерно одинаковы (450–500 экз./м² и 160–170 г/м²). Она наиболее обильна в 0–10 см слое почв (до 50-75 %) и подстилке (25–55 %). Незначительные различия обусловлены свойствами почв, которые в «Лосином острове» по сравнению с «Битцевским лесом» имеют более легкий гранулометрический состав, большую кислотность и меньшее содержание органического углерода.

По мере увеличения рекреационной нагрузки снижается численность и биомасса почвенных беспозвоночных (Рис. 1,2). Численность к III стадии дигрессии снижается в 1.3-1.4 раза, что обусловлено, главным образом, угнетением комплекса беспозвоночных подстилки. На V стадии дигрессии суммарная численность мезопедобионтов снижается в 2.1-2.3 раза, наиболее заметно в подстилке: в «Лосином острове» в - 4 раза, а в «Битцевском лесу» - в 7 раз. Таким образом, с ростом рекреационной нагрузки относительная доля мезофауны в подстилке уменьшается, а в минеральных слоях почвы увеличивается.

Статистически значимое уменьшение суммарной биомассы почвенных беспозвоночных отмечено уже на II стадии дигрессии, а при переходе к V стадии она снижается в 2-2.5 раза (Рис.2).

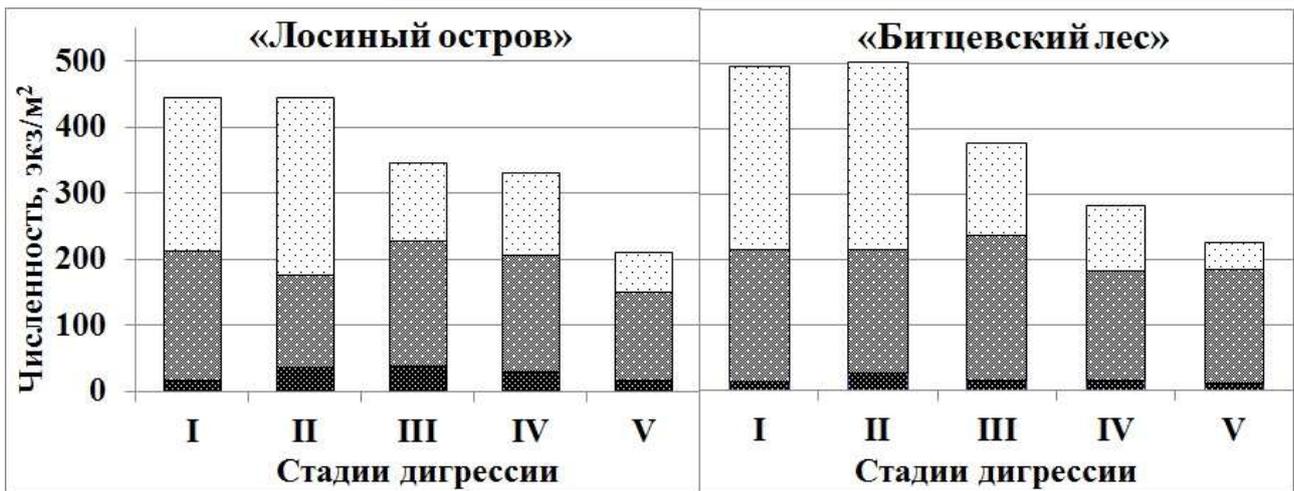


Рис.1. Численность [экз/м²] мезофауны на участках разных стадий дигрессии.

Примечание: подстилка слой 0-10 см слой 10-20 см

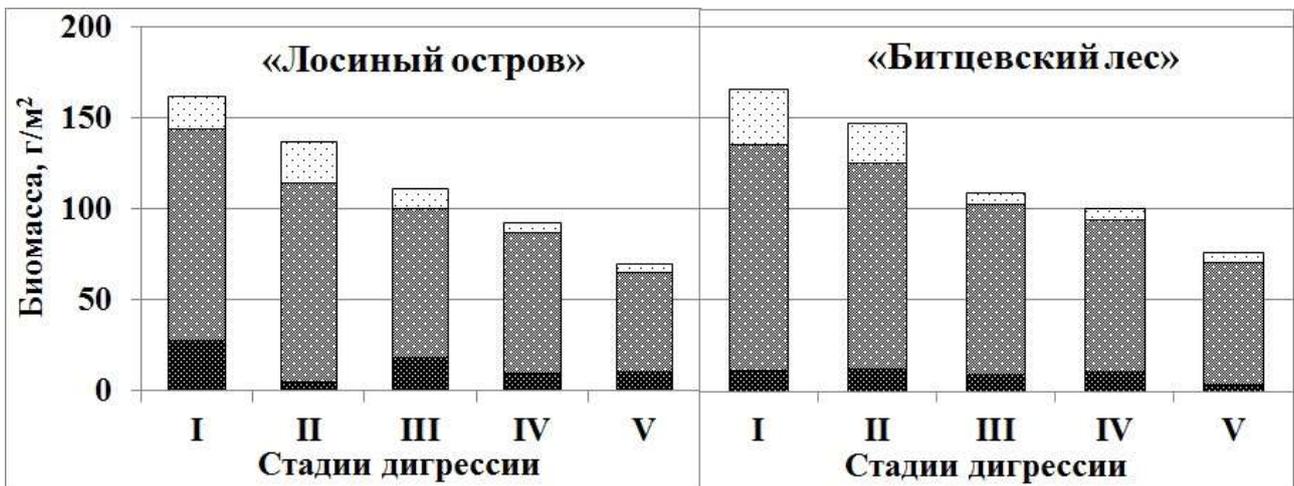


Рис.2. Биомасса [г/м²] (n=3) мезофауны на участках разных стадий дигрессии

Примечание: подстилка слой 0-10 см слой 10-20 см

На изучаемых объектах обнаружены представители 6 классов мезопедобионтов, среди которых определены особи 18 систематических групп и представители всех типов питания. На I-III стадиях дигрессии встречаются 13-15 систематических групп беспозвоночных. По мере усиления рекреационной нагрузки (IV-V стадии дигрессии) их число снижается на 3-4 группы. Однако в разных горизонтах закономерности изменения количества групп неодинаковы: наибольшие изменения отмечены в подстилке, где их число снижается с 10-12 до 4-5.

По мере усиления рекреационной нагрузки меняется долевое участие различных классов мезопедобионтов – преобразуется их структурно-функциональная организация. Увеличивается доля малощетинковых червей с 17-22 до 53-77 % и в 2-3 раза снижаются доли паукообразных, насекомых и многоножек. О снижении разнообразия мезопедобионтов свидетельствует уменьшение величины индекса Шеннона-Уивера с 2.2 на I стадии до 1.7 и 1.0 к V стадии дигрессии, соответственно, в «Лосином острове» и «Битцевском лесу».



Стоит отметить, что изменения большинства свойств почв выражены менее резко по сравнению с показателями состояния комплекса мезопедобионтов, что, вероятно, обусловлено их высокой чувствительностью к изменениям условий среды при рекреации.

Среди свойств почв, которые, по всей видимости, оказывают наибольшее влияние на почвенных беспозвоночных, значимо изменяясь при малой рекреационной нагрузке (II-III стадии дигрессии), выделяются твердость и показатели структурного состояния. Кроме этого существенный вклад вносит изменение характеристик подстилки.

Выводы

Установлена четкая закономерность ухудшения состояния почвенных беспозвоночных по мере увеличения рекреационной нагрузки в результате изменения условий их местообитания. Наиболее заметно с увеличением рекреационной нагрузки изменяется комплекс мезопедобионтов горизонта подстилки. Значительное преобразование состояния почвенных беспозвоночных даже на ранних стадиях дигрессии позволяет считать их весьма чувствительным индикатором на рекреационную нагрузку и изменения условий среды.

Литература

1. Гиляров М.С. Учет крупных почвенных беспозвоночных (мезофауны) // Методы почвенно-зоологических исследований, М., 1975. с.12-29.
2. Грюнталь С.Ю. Почвенные беспозвоночные в условиях рекреационного лесопользования // Влияние рекреации на лесные экосистемы и их компоненты. М., 2004. с. 215-248.
3. Захаров А.А., Бызова Ю.Б., Уваров А.В., Залеская Н.Т. и др. Почвенные беспозвоночные рекреационных ельников Подмосковья. М., 1989. 233 с.
4. ОСТ 56-100-95. Методы и единицы рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы. М., 1995. 14 с.
5. Теория и практика химического анализа почв. Под ред. Л.А. Воробьевой. М., 2006. 400 с.
6. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.



УДК 631.431.1; 631.435; 911.373.92

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПЛОТНОСТИ ГУМУСОВЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ ЗАБРОШЕННЫХ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Мартыненко И.А.¹, Мешалкина Ю.Л.¹, Гончарук Н.Ю.²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
martynenko.irina@gmail.com

²ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России, Москва, Российская Федерация
n_goncharuk@mail.ru

SPATIAL HETEROGENEITY OF THE HUMUS HORIZONS DENSITY OF ABANDONED RURAL SETTLEMENTS SOILS

Martynenko I.A.¹, Meshalkina J.L.¹, Goncharuk N.Ju.²
¹Soil Science Faculty of MSU, Moscow, Russia

²The Russian Federal Center of Forensic Science of the Ministry of Justice (RFCFS), Moscow, Russia

Annotation: Values of the humus horizons density of rural settlements soils correlate with the land use type and the age of reforestation. The density of the humus horizons of the former buildings and the dirt roads are significantly higher from those of the former gardens, orchards and arable lands (1,7 and 1,4 g/cm³, respectively). There is an increase in the physical sand content by about 10% in urbic horizons of rural residential areas on sandy loam rocks comparing to the postagrogenic ones. However, they do not differ from each other in terms of density that may be related with a higher (2-3 times) of organic carbon content in the urban horizons compared to the postagrogenic ones.

Введение

Согласно Всероссийской переписи населения 2010 г. в стране заброшено 12,7% сельских населенных пунктов, что составляет около 1,5 млн. га (Итоги..., 2013). Так, в настоящее время в Тверской и Ярославской областях примерно в четверти из них население отсутствует полностью. Структура почвенного покрова таких территорий представлена сочетаниями мозаиками урбаноземов и урбо-почв участков бывших строений и придомовых зон, постагроземов территорий садов и огородов, а также постагрочув бывших пахотных земель. После прекращения антропогенного воздействия на пахотные почвы таежно-лесной зоны наблюдается постепенное восстановление генетического профиля природных почв с последовательной сменной биогеоценозов в ряду агроценоз – луг – лес (Преобразование почв... 1981; Баранова, 1987). На этапе залежи верхняя часть агрогумусового горизонта трансформируется, разделяя его на минимум 2 подгоризонта: дерновый и нижний – собственно постагрогенный. В дальнейшем при лесовозобновлении дерновый горизонт сменяется гумусо-аккумулятивным, на поверхности формируется лесная подстилка, а нижняя часть постагрогенного горизонта приобретает признаки оподзоливания, хотя признаки сельскохозяйственного освоения сохраняются под лесом до 100 – 120 лет (Баранова, 1987). Максимально долго в почвенном покрове сохраняются следы антропогенного воздействия в сильно преобразованных местах: межевые границы участков, бывшие грунтовые дороги, территории бывших строений, при этом в верхней части урбиковых горизонтов урбо-почв и урбаноземов также формируется дерновый горизонт, однако нижняя часть сохраняется неизменной (Мартыненко, Гончарук, 2004). Трансформация затрагивает как



морфологические, так и физические свойства антропогенно-преобразованных горизонтов, в частности плотность сложения.

Целью работы было изучение влияния различных факторов (времени зарастания, типа горизонта, характера землепользования и др.) на дифференциацию гумусового горизонта заброшенных сельских селительных зон по плотности сложения почв.

Объекты и методы

В обследовании участвовали два ключевых участка, представляющие собой территории бывших сельских поселений, включая селитебную зону, сады, огороды, пашни и грунтовые дороги, расположенные на песчаных флювиогляциальных отложениях камовых холмов моренных равнин таежно-лесной зоны.

Первый ключевой участок расположен в Тверской области в 81 и 96 кварталах Центрально-лесного биосферного заповедника внутри целостного массива коренных ненарушенных еловых лесов на водоразделе р. Межи и Старосельского ручья (урочище «Красное»). Растительный покров представлен закономерной сменой биоценозов. По склонам участка разнотравно-злаковой залежи последовательно сменяются лесными различного возраста и состава - от 20-30-летних березняков к 60-70 летним березнякам с еловым подростом и до 100-120 летних ельников. Второй участок находится в Мышкинском районе Ярославской области на водоразделе рек Сутка и Катка (урочище «Козьмодемьянка»). Территория расположена внутри массива вторичных мелколиственных лесов, сформировавшихся на месте господствовавших до начала освоения неморальных липняковых и чернично-зеленомошных ельников. Почвы представлены ржавоземами и дерново-подзолами на двучленных отложениях. В качестве фона были выбраны серогумусовые горизонты целинных почв (ржавоземов и дерново-подзолов) под коренными 120-130-летними лесами.

По данным Генерального межевания и архивным материалам обе территории уже были заселены к XVII веку и активно использовались под огороды, пашни и сенокосы вплоть до 70-х годов XX-го века (Баранова, 1987; Мартыненко, Гончарук, 2004).

Всего на первом участке было отобрано 115 проб гумусо-аккумулятивных горизонтов из 73 точек, на втором - 28 проб из 11 точек. Для всех точек было проведено морфологическое описание верхней части профиля почв. Гранулометрический состав определялся методом пипетки Качинского-Робинсона-Кёхля. Плотность определялась буровым методом Качинского.

Был проведен многофакторный дисперсионный анализ без взаимодействия, где в качестве отклика рассматривалась плотность, а в качестве факторов были использованы следующие показатели: местоположение ключевого участка (регион), тип землепользования до забрасывания (строения, дороги, сады-огороды, пашни, лес), современный тип растительности (древесная, разнотравно-злаковая), возраст древесной растительности (отсутствует, 20, 40, 60, 80, 110), характер генетического горизонта (Ad, Апах, U, A1), глубина залегания горизонта (поверхностный, нижележащий).



Результаты и обсуждение

Гумусо-аккумулятивная часть профиля почв обоих ключевых участков представлена четырьмя типами горизонтов. Выделяется два поверхностных горизонта (дерновый (Ad) под разнотравно-луговой растительностью зарастающих пашен и серогумусовый (A1) под лесной растительностью) и два подповерхностных (постагрогенный (A_{пах}) - на участках бывших пашен, огородов и садов и урбиковый (U) - на участках бывших строений). На участках грунтовых дорог постагрогенный горизонт залегает либо под дерновым, либо с поверхности. Верхние горизонты почв обоих ключевых участков сложены супесью со средним содержанием фракции >0.01 мм от 81% до 85% в естественных и постагрогенных горизонтах. Урбиковые горизонты характеризуются несколько более легким гранулометрическим составом – доля физического песка от 83% до 92%.

В среднем ключевые участки по плотности гумусо-аккумулятивных горизонтов не различались (в Тверской области – 1,39 г/см³, Ярославской – 1,40 г/см³), поэтому данные были объединены в один массив.

Как известно, трансформация верхней части профиля почв при лесовосстановлении идет по пути формирования на поверхности пахотных и урбиковых горизонтов дернового горизонта. Позднее, с поселением древесной растительности на бывших пашнях, дерновый горизонт трансформируется в серогумусовый. Вместе с тем, на участках бывших грунтовых дорог и строений древесная растительность не наблюдалась.

Анализ показал, что наименьшее среднее значение плотности характерно для серогумусовых горизонтов A1 под древесной растительностью старше 60 лет, оно значимо отличается от всех остальных. Плотность сложения дернового горизонта выше, чем серогумусового. Средние значения плотности подповерхностных (постагрогенных и урбиковых) горизонтов выше и значимо отличаются от поверхностных (рис. 1).

В городских почвах средние значения плотности урбиковых горизонтов обычно лежат в пределах 1,4-1,6 г/см³ (Technogenic..., 2013; Герасимова и др., 2017). Повышение плотности объясняется синлитогенным характером урбикового горизонта. При этом в сельских условиях попадающий на поверхность материал практически не содержит каменистый строительный мусор, хотя мощность этих горизонтов составляет более 40 см, что, согласно определению урбикового горизонта (Prokof'eva et al., 2014), свидетельствует об интенсивности антропогенного воздействия, сопоставимого с городскими условиями. Легкий гранулометрический состав почв обследованных участков способствует увеличению средних значений плотности урбиковых горизонтов до 1,65 г/см³, несмотря на отсутствие большого числа включений строительного мусора.

Анализ влияния типа землепользования на плотность гумусо-аккумулятивной части профиля показал, что пашни и сады-огороды не отличаются между собой. Максимальные значения закономерно приурочены к строениям и дорогам, которые также не отличаются между собой (рис. 2).

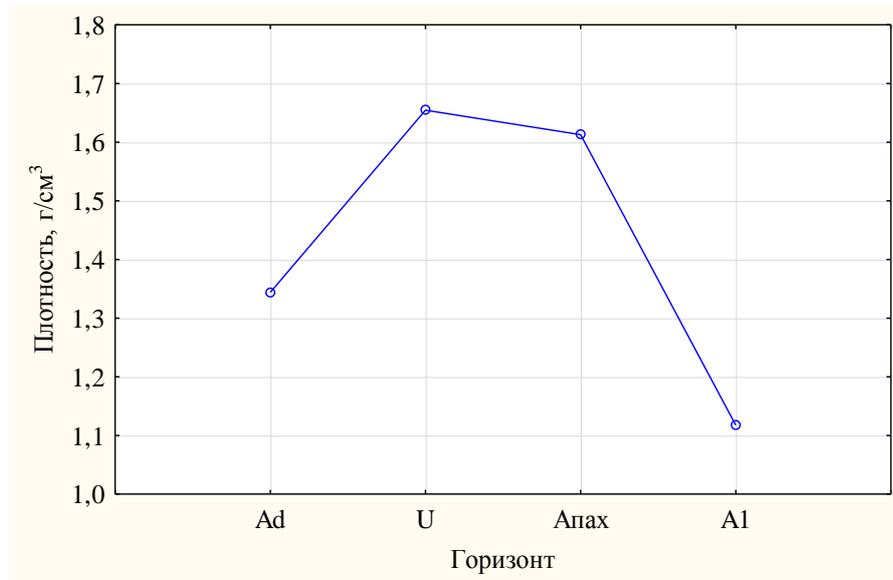


Рис. 1. Средняя плотность различных типов гумусово-аккумулятивных горизонтов

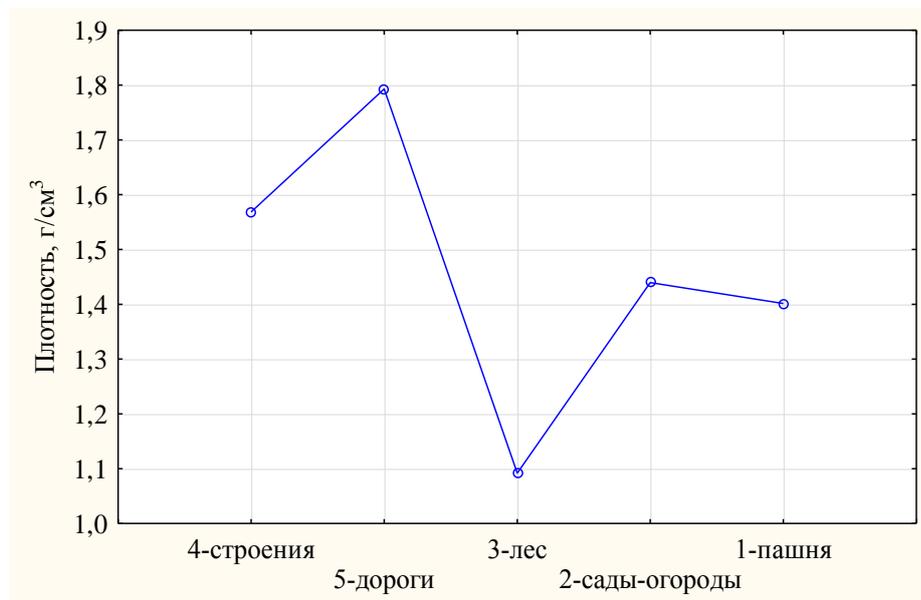


Рис. 2. Средняя плотность участков с различными типами землепользования

Анализ влияния возраста лесовосстановления на плотность почв показал, что значительно выделились 3 группы, достоверно отличающиеся между собой: участки лугов и молодые (до 30 лет) березняки, 40-80-ти летние березняки с подростом ели и 100-130 летние леса. Плотность верхней части гумусо-аккумулятивных горизонтов закономерно снижается в этом ряду от 1,06 г/см³ до 1,26 г/см³ и 1,51 г/см³ соответственно.

Выводы

За прошедшие 50 лет с момента забрасывания проявилась пространственная неоднородность в распределении плотности верхней части гумусовых горизонтов заброшенных сельских поселений - краевые участки, находящиеся в стадии лесовосстановления более 40 лет, характеризуются более низкими значениями плотности.



Плотность сложения дернового горизонта вне зависимости от типа бывшего землепользования, одинакова.

Характер землепользования определяет среднюю плотность гумусовых горизонтов, разделяя территорию сельских поселений на две зоны: участки бывших строений и грунтовых дорог с значениями плотности, превышающими оптимальные, и участки бывших огородов, садов и пашен, с значениями, близкими к оптимальным.

В урбиковых горизонтах сельских селитебных зон на супесчаных породах происходит увеличение содержания физического песка примерно на 10% по сравнению с постагрогенными, однако это не приводит к увеличению их плотности сложения, что может быть связано с более высоким (в 2-3 раза по сравнению с постагрогенными) содержанием в них органического углерода.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

- Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. (2017) Антропогенные почвы. М.: Издательство Юрайт, 263 с.
- Преобразование почв Нечерноземья при сельскохозяйственном освоении. (1981) Отв. ред. Б.Ф.Апарин. М.: Почв. ин-т, 125 с.
- Баранова О.Ю. (1987) Антропогенное изменение дерново-подзолистых почв и их эволюция при забрасывании пашенных земель. дисс ... канд. биол. Наук, М., 198 с.
- Итоги Всероссийской переписи населения 2010 года. (2013) Том 1. Численность и размещение населения. Федеральная служба государственной статистики. http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/perepis_itogi1612.htm (актуально на 16.05.2019).
- Макарова О.В. (1994) Изменение основных свойств лесных почв Подмосковья после сплошной рубки и их влияние на лесовозобновление. дисс... канд. с-х. наук, М., 23 с.
- Мартыненко И. А., Гончарук Н. Ю. (2004) Динамика почвенного и растительного покрова забрасываемых сельхозугодий лесной зоны. *Тезисы докладов 4 съезда Докучаевского общества почвоведов Почвы – национальное достояние России*. Т. 2. Новосибирск: Наука-Центр, С. 346–346.
- Преобразование почв Нечерноземья при сельскохозяйственном освоении (1981). Науч. тр. / ВАСХНИЛ, Почв. ин-т им. В.В.Докучаева, Центр. музей почвоведения им. В.В.Докучаева; [Отв. ред. Б. Ф. Апарин]. М.: Почв. ин-т. 125 с.
- Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O S. et al. (2014) Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the russian soil classification system. *Eurasian Soil Science*, 47, 959–967. <https://doi.org/10.1134/S1064229314100093>
- Technogenic soils of Poland (2013) Ed. by P.Charzyński, P.Hulisz, R.Bednarek. PSSS. Toruń, 357 P.



УДК 574.54: 631.461.1

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДА И АЗОТА В НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ТУНДРОВЫХ ПОЧВАХ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

Маслов М.Н., Поздняков Л.А., Маслова О.А., Ежелев З.С.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12

maslov.m.n@yandex.ru

Annotation: The influence of oil pollution caused by the accident of 1994 on the biological activity of Histic Cryosols is considered. The most significant differences associated with the predominance of methanogenesis over aerobic oxidation of organic matter and pronounced nitrogen losses during denitrification are characteristic of the reclamation option using sewage sludge. To reduce the rate of methanogenesis and nitrogen losses, as well as to reduce the density of the surface layer, it is necessary to recommend re-harrowing of this site. The effectiveness of high starting doses of nitrogen mineral and organic fertilizers should be recognized as low due to the suppression of biological nitrogen fixation and nitrogen losses as a result of increased activity of denitrification.

Круговорот углерода (С) и азота (N) имеет фундаментальное значение для поддержания экологического равновесия и нормального функционирования экосистем. Тундровые экосистемы как правило являются зоной стока атмосферного углерода, однако хозяйственное освоение данных территорий, в частности, добыча и транспортировка углеводородного сырья, может в существенной степени трансформировать биогеохимический цикл элементов. Исследование микробиологической трансформации углерода и азота в нефтезагрязненных тундровых почвах дает возможность оценить биогенную составляющую баланса этих элементов и их динамику при воздействии нефти и проведении рекультивационных работ.

Общая характеристика объекта исследования

Исследования проводили на территории участка «Возей – Головные сооружения» (66°25 с.ш., 67°18 в.д., Республика Коми), на котором в 1994 г. произошла авария на магистральном трубопроводе с выбросом в окружающую среду от 60 до 270 тыс. тонн сырой нефти. Работы по рекультивации данной территории проводились разными способами, среди которых нами рассмотрены: (1) промывка загрязненной почвы на специализированной установке для твердых нефтешламов – на этом участке сформирован реплантозем; (2) смыв нефти и запахивание оставшейся – на этом участке формируется тундровая глеевая торфянистая пахотная почва; (3) замена загрязненного слоя песчаным с размещением на его поверхности осадков сточных вод мощностью 15-30 см – формируются артификабаты подгруппы артифимостраты; (4) частичный смыв нефти – с развитием тундровой глеевой почвы. Почвенный покров фоновой территории представлен тундровой глеевой торфянистой почвой.

Поверхностный слой фоновой почвы представлен торфянистым горизонтом с высоким содержанием углерода (42.0±2.4%) и относительно низким содержанием азота (1.0±0.2%). Значение рН водной вытяжки колеблется в пределах 5.0-5.5. Поверхностные слои почв и техногенных поверхностных образований (ТПО) на разных участках рекультивации характеризуются достаточно высоким содержанием С (5-20%), но низким (0.2-1.0%) содержанием общего азота. Высокая концентрация азота (3.2%) отмечена только в варианте рекультивации с внесением богатого азотом осадка сточных вод. При всех вариантах



рекультивации рН поверхностного слоя почв и ТПО варьирует в пределах 5.5-6.5, но при внесении осадка сточных вод рН водной вытяжки повышается до 7.0-7.5, что, прежде всего, связано со свойствами вносимого осадка. Несмотря на проведенные рекультивационные мероприятия, все исследованные почвы и ТПО содержат высокие концентрации углеводородов (УВ) нефти. Наиболее высокая концентрация УВ (60628 мг/кг) отмечены на участке с частичным сбором нефти с загрязненным слоем почвы (вариант 4).

Методы исследования

Лабильные формы С и N экстрагировали 0.05 М K_2SO_4 . Углерод и азот микробной биомассы ($C_{\text{микр}}$, $N_{\text{микр}}$) определяли методом фумигации-экстракции. Показатели биологической активности поверхностных слоев ТПО и горизонтов почв определяли в 3-5 кратной повторности при температуре + 22 °С. Базальное дыхание (PR) определяли после инкубации почвенных образцов в течение 1 суток. Скорость субстрат-индуцированного дыхания (SIR) определяли в тех же флаконах через 3 часа после внесения в почву 1-% раствора глюкозы. Потенциальную (с добавлением 1-% раствора глюкозы) активность метаногенеза определяли после инкубации образцов почв в анаэробных условиях в течение 7 суток. Активность метанотрофии оценивали по убыли метана в течение 1 и 7 суток после введения в флакон с почвой 1 мл газовой смеси, содержащей 1 ppm CH_4 . Потенциальную скорость азотфиксации определяли по восстановлению ацетилена до этилена образцом почвы в течение 1 суток. Активность азотфиксации рассчитывали с пересчетом количества образовавшегося этилена в количество фиксированного азота в соотношении 1:3. Потенциальную скорость азотфиксации определяли по эмиссии образцом почвы закиси азота в анаэробных условиях в течение 1 суток.

Лабильный и микробный пул углерода и азота почв

Поверхностный слой фоновой почвы, представленный торфянистым горизонтом, характеризуется высоким содержанием лабильного углерода и азота. Содержание лабильного углерода в верхнем минеральном слое почв и ТПО при разных вариантах рекультивации значительно ниже фонового и колеблется в пределах 270-800 мг/кг, а лабильного азота – от 11 до 197 мг/кг. Минимальные концентрации С и N приурочены к варианту 4 (сбор нефти), а максимальные характерны для артифимостратов (вариант 3), сформированных в автоморфных позициях.

Почвы и ТПО существенно различаются по содержанию $C_{\text{микр}}$ и $N_{\text{микр}}$ (рис. 1), при этом существенные различия характерны не только для фоновой и рекультивированных почв, но и для почв, рекультивированных разными способами. Так, наибольшее содержание $C_{\text{микр}}$ характерно для автоморфной серии артифимостратов (вариант 3.1 и 3.2), а также автоморфного участка при очистке почв на установке для нефтешламов (вариант 1.2). Высокое содержание $C_{\text{микр}}$ на этих участках связано как с лучшим тепловым и водно-воздушным режимом, предотвращающим застой влаги и обеспечивающим поверхностный и латеральный отток УВ, так и с внесением в почву минеральных удобрений и/или органического субстрата.

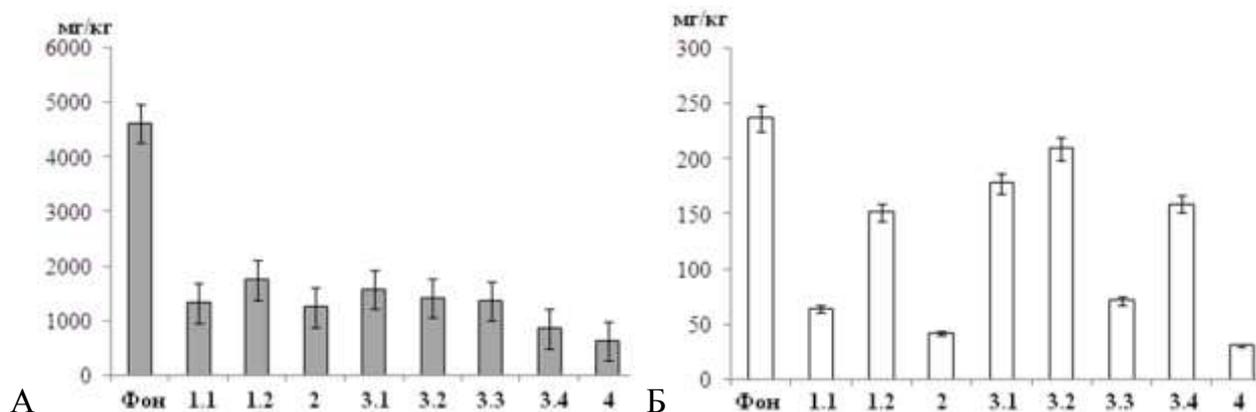


Рис. 1. Концентрация углерода (А) и азота (Б) микробной биомассы в верхнем 10-см слое почв и ТПО разных вариантов рекультивации.

В рекультивированных почвах по сравнению с почвой фонового участка существенно снижается концентрация лабильного азота, однако повышается доля минеральных форм, особенно аммонийного азота, в его составе. При внесении в почву минеральных азотных удобрений, основной минеральной формой азота в почвах является аммонийная (варианты 1.1, 1.2, 2). Однако при внесении осадка сточных вод существенно повышается доля нитратов, т.к. образование нитратов в ходе гетеротрофной нитрификации, условием осуществления которой является наличие достаточного количества $N-NH_4^+$ и органического вещества. Кроме того, нейтральное значение рН в почвах этого варианта рекультивации, также способствует снижению ингибирования нитрификации. В то же время, высокие концентрации нефти (вариант 4) приводят к истощению минерального пула азота.

Трансформация соединений углерода

Основным путем трансформации соединений углерода в большинстве исследуемых почв является их аэробная минерализация с образованием CO_2 . При этом способ рекультивации территории оказывает значительное влияние на интенсивность PR и SIR. Большинство почв характеризуется низкими значениями PR, при этом минимальная интенсивность базального дыхания характерна для наиболее загрязненной УВ почвы (вариант 4). Почвы и ТПО, сформированные в автоморфных позициях, характеризуются более высокими показателями биологической активности. Полученные нами данные позволяют заключить, что интенсивность минерализации органического вещества почв находится приблизительно на одинаковом уровне при всех вариантах рекультивации, но при этом минерализация органического вещества достоверно в 2-10 раз ниже, чем в фоновой почве и зависит от положения почвы в рельефе. Минерализационный потенциал микробной биомассы (определяемый по величине SIR) также подчиняется этой закономерности.

Отдельно следует рассмотреть показатели микробиологической трансформации углерода в артифимостратах (вариант 3), в которых преобладающим путем углеродного метаболизма является образование метана. Основной причиной столь сильного отличия пути трансформации С в почвах данного варианта от остальных является сочетание высокой концентрации доступного органического вещества и формирования плотного поверхностного слоя, затрудняющего доступ воздуха и длительное время удерживающего избыток воды. Наиболее выражен метаногенез в поверхностном слое гидроморфного лишенного растительности участка (вариант 3.3).



Процессы окисления метана в изученных почвах не выражены. Отсутствие выраженной метанотрофии в большинстве рекультивированных почв, на наш взгляд, заключается в том, что основной фермент метанотрофии – метанмонооксигеназа – имеет сходство с ключевым ферментом нитрификации (аммониймонооксигеназой) и в присутствии ионов NH_4^+ переключается с окисления метана на окисление аммония.

Трансформация соединений азота

Большинство рекультивированных почв и ТПО характеризуются низкой потенциальной скоростью азотфиксации (1.6-14.8 мкг N_2 /кг/сутки), что связано с ингибированием этого процесса в присутствии NH_4^+ . Максимальная потенциальная скорость азотфиксации отмечена в наиболее загрязненной УВ почве (вариант 4). Активизация процесса фиксации атмосферного азота здесь, очевидно, связано с крайне низкой обеспеченностью микроорганизмов минеральным N, а также наличием большого количества анаэробных микрзон. Следует отметить, что активизация азотфиксации происходит только после добавления в почву глюкозы в качестве доступного источника углерода и энергии, в естественных же условиях в нефтезагрязненной почве этот процесс протекает крайне слабо. Одним из путей интенсификации процесса самовосстановления тундровых почв после загрязнения нефтью может быть поиск способов активизации естественного азотфиксирующего микробного комплекса. Низкая концентрация нитратов во всех почвах (за исключением варианта рекультивации с внесением осадка сточных вод) обуславливает крайне низкую потенциальную скорость денитрификации во всех образцах. При внесении осадка сточных вод в почвах относительно активно протекает процесс образования N_2O , наиболее выраженный в почве гидроморфного участка без растительности за счет создания анаэробных условий и максимальной концентрации нитратов в естественном состоянии.

Заключение

Таким образом, рекультивированные разными способами почвы и техногенные поверхностные образования различаются по скорости и направленности микробиологической трансформации соединений углерода и азота. Наиболее существенные различия, связанные с преобладанием метаногенеза над аэробным окислением органического вещества и выраженными потерями азота при денитрификации, характерны для варианта рекультивации с использованием осадка сточных вод. Для снижения скорости метаногенеза и потерь азота, а также уменьшения плотности поверхностного слоя необходимо рекомендовать повторное боронование этого участка. Эффективность высоких стартовых доз азотных минеральных и органических удобрений следует признать низкой из-за подавления биологической азотфиксации и потерь азота в результате повышения активности денитрификации.



УДК 631.4: 502.2

“КАРБОНАТНЫЕ АККУМУЛЯЦИИ В СПЕЦИФИЧЕСКИХ ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ ”

Прокофьева Т.В.¹, Шишков В.А.², Кирюшин А.В.¹

¹ Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
tatianaprokofieva@yandex.ru, akiriushin@front.ru

² Институт географии РАН, Москва, Российская Федерация;
vshishkov@yandex.ru

CARBONATES ACCUMULATIONS IN URBAN SOILS

¹Prokofeva T.V., ²Shishkov V.A., ¹Kiriushin A.V.

¹Soil Science faculty of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Annotation: Carbonate accumulations in modern and buried humus-accumulative horizons of Urban Technosols (Urbostratozems in Russian) were studied in thin sections and on electron microscope. Accumulations of carbonates can be not only anthropogenic inclusions, but also newly formed materials due to various processes of soil formation. Different forms of carbonates correspond to automorphic and hydromorphic conditions.

Введение

Наличие карбонатов способствует формированию определенных свойств почв вне зависимости от их зональной принадлежности. Такие почвы отличаются нейтральным или щелочным рН, насыщены основаниями, имеют преимущественно гуматный гумус, выраженную структуру или сцементированность отдельных горизонтов.

Москва расположена в зоне южной тайги с умеренным и умеренно-континентальным климатом и промывным водным режимом. Город расположен на территории с широким почвенно-ландшафтным разнообразием, но основная масса почв и пород бескарбонатны. Почвы города, сформированные на техногенных отложениях, имеют значительное количество карбонатов за счет включений строительного мусора (Почва, город, Экология, 1997). Кроме того в состав городской атмосферной пыли входит значительное количество карбонатов, до 10% (Прокофьева и др., 2015). При полевом описании отмечается не только отдельные включения реагируют с HCl 10%, но и сплошная реакция мелкозема. Это дает возможность предполагать, что в городских почвах протекает активное растворение и перераспределение карбонатного наследия. Аккумуляции карбонатного материала могут быть не только включениями, но и иметь новообразованный характер (Александровский, Александровская, 2005; Каздым, 2006).

Объекты и методы

На разных морфологических уровнях организации почв изучены карбонатные аккумуляции в современных и погребенных гумусово-аккумулятивных и техногенных горизонтах типичных городских почв урбостратоземов с разной степенью гидроморфизма. В шлифах на микроскопе ЛОМО-ПОЛАМ Л-213 (микроморфологический уровень); на электронном микроскопе JEOL 6610 LV с микроанализатором INCA XACT (субмикроморфология) (Институт географии РАН).

В автоморфных почвах изучены образцы с глубин от 2 до 200 см. Все исследованные горизонты имеют нейтральную или слабощелочную реакцию среды и содержание $\text{CaCO}_3 >$



1%. Гранулометрический состав разный: от связнопесчаного до суглинистого. Содержание органического углерода варьирует в широких пределах.

Результаты и обсуждение

На всех уровнях – мезо-, макро-, микро- и субмикро уровне обнаружены антропогенные карбонатные включения – фрагменты твердых строительных растворов, в том числе дорожных покрытий, известняк. Карбонатные включения, в отличие от новообразований, помимо кальцита, содержат доломит. Наблюдаются растворение и перекристаллизация карбонатных включений. В то же время нельзя не отметить, что они сохраняются в почвах достаточно долгое время, несмотря на залегание неглубоко от поверхности и промывной водный режим.

При изучении в шлифах и на электронном микроскопе обнаружены карбонатные выделения являющиеся новообразованиями. Форма выделения новообразованных карбонатов – мелко- и микрокристаллические скопления, образующиеся при перекристаллизации включений, отдельные рассеянные в почвенной массе кристаллы и микрокристаллические нодулы (0,1 -0,5 мм), что было подтверждено при исследовании на субмикроморфологическом уровне (рис.1). Нодулы состоят из кристаллов кальцита размером > 4 мкм.

Отмечено было также наличие карбонатных сферических конкреций (сферолитов) в местах скопления экскрементов домашних животных (верхние горизонты газонов). Такие же эти новообразования связанные с жизнедеятельностью кишечной палочки (*Escherichia coli*) встречены в центре города на месте вскрытой археологическим раскопом выгребной ямы 19 в (рис.2) (раскоп на исторической территории МГУ, археолог Кренке Н.А.).

В результате регуляции речного стока поймы городских рек большей частью вышли из аллювиального седиментогенеза. Гидроморфные позиции рельефа в городах обычно бывают перекрыты толщей антропогенных грунтов. Поверхность здесь приподнята за счет заполнения депрессий техногенными отложениями. Однако можно утверждать, что подтопление и сопровождающая его гидрогенная аккумуляция веществ (характерные для пойменного и др. гидроморфного почвообразования) не прекратились, так как влияние грунтовых вод на почвы бывших оврагов и речных долин продолжается. Гидроморфизму подвержены не только сохранившиеся природные почвы парков, но и специфические городские почвы.

В подтопляемых горизонтах признаки кристаллизации карбонатов проявляются уже в форме сплошной карбонатной пропитки (микрокристаллы -микрит) в сохранившихся поймах рек с глубины 20-30 см, в подтопляемых урбостратоземах на глубине около 1 м и ниже. Глинисто-карбонатные натёки обнаружены в горизонтах, где сочетаются признаки аллювиального почвообразования и городского педоседиментогенеза (Прокофьева и др., 2010).

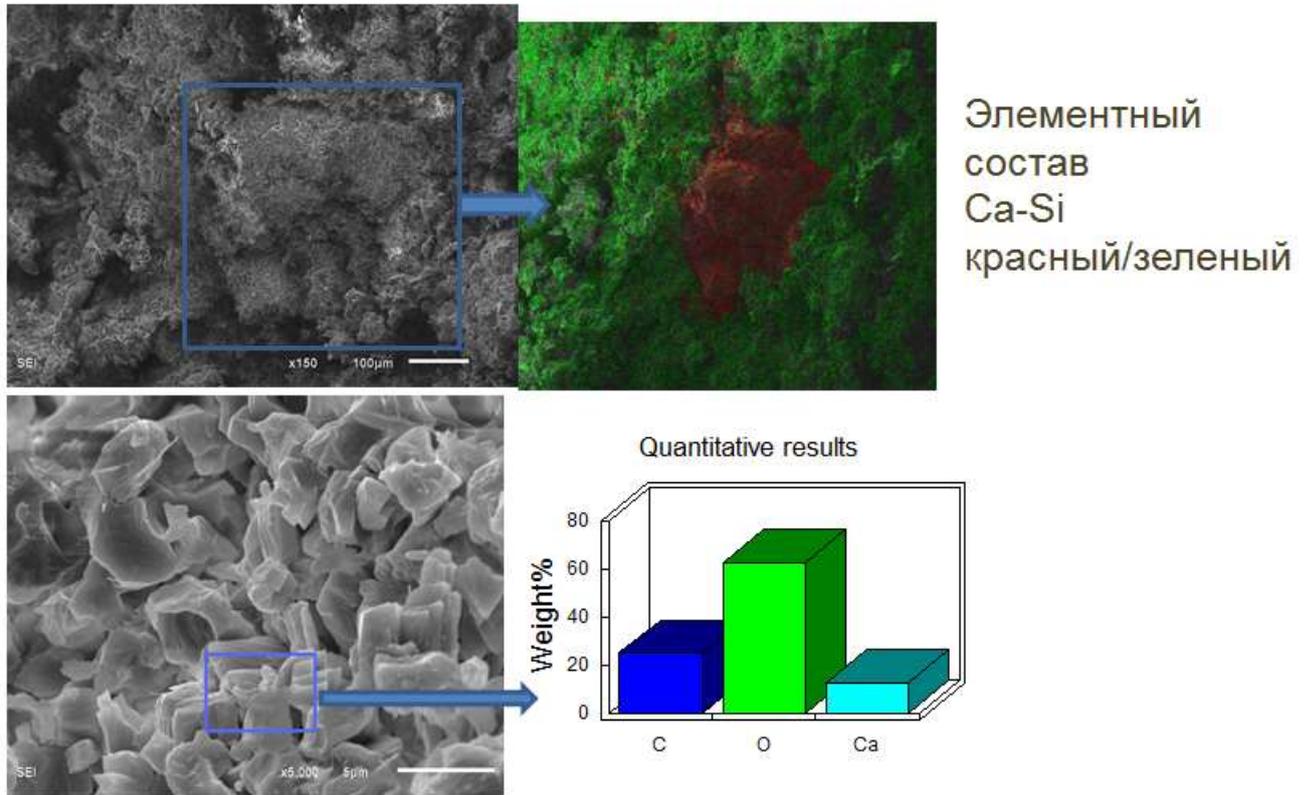


Рис.1. Субмикроскопическое исследование новообразованного нодуля кальцита

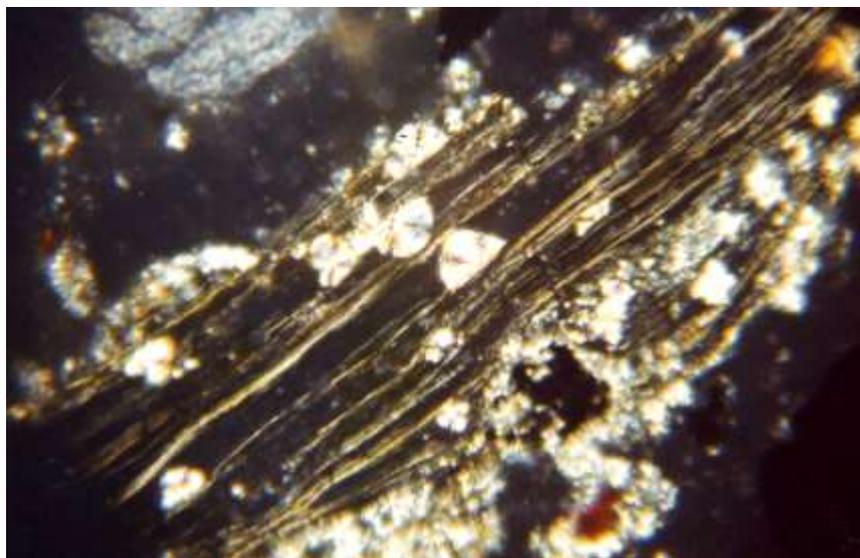


Рис.2. Фекальные сферолиты на фрагментах древесины. Увеличение 10X10. XRF

Выводы

Скопления карбонатов могут быть не только антропогенными включениями, но и новообразованиями, сформированными процессами почвообразования.

Наличие карбонатных нодулей состоящих из кристаллов кальцита размера микропарита в толще силикатного материала может свидетельствовать не только о процессах растворения и перераспределения карбонатного наследия, но и о возможности



образования карбонатных новообразований при взаимодействии почвенного раствора и почвенного поглощающего комплекса.

Различные формы карбонатов соответствуют автоморфным и гидроморфным условиям формирования горизонтов городских почв.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке: грантов РФФИ № 15-04-04702, 19-04-01298,- полевые работы и сбор образцов, определение свойств почв и их интерпретация; Государственного задания 0148-2019-0006 - разработка подходов определению и изучению карбонатных включений и новообразований в почвах при микроскопических исследованиях.

Литература

Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. М.: Наука, 2005. 223 с.

Каздым А.А. (2006) Техногенные отложения древних и современных урбанизированных территорий. Москва. Наука. 158 с.

Почва. Город. Экология. (1997) ред. Добровольский Г.В. Из-во «Фонд за экономическую грамотность». М. 320 с.

Прокофьева Т.В., Варава О.А., Седов С.Н., Кузнецова А.М. (2010) Морфологическая диагностика почвообразования в антропогенно-измененных поймах рек на территории г.Москвы // Почвоведение/ издательство Наука (М.), № 4, с. 399-411

Прокофьева Т.В., Шишков В.А., Кирюшин А.В., Калущин И.Ю. (2015) Свойства твердых (пылеаэрозольных) атмосферных выпадений придорожных территорий г. Москвы. Известия Российской академии наук. Серия географическая, издательство Наука (М.), 3, с. 107-120



УДК...

ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ПРИРОДНЫХ ЗОН ПАРКЕ «ЗАРЯДЬЕ»: ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ФОРМИРОВАНИЯ

¹Раппопорт А.В., ²Умарова А.Б., ²Бутылкина М.А., ²Гасина А.И., ³Кутьева Е.В.

¹Биологический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

arapp@mail.ru

²Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

³ Государственное автономное учреждение культуры г. Москвы «Парк «Зарядье»

THE SOIL COVER OF THE NATURAL AREAS OF THE PARK "ZARYADYE": TECHNOLOGIES AND RESULTS THE FORMATION

¹Rappoport A., ²Umarova A., ²Butilkina M.A., ²Gasina A.I., ³Kutieva E.V.

¹Biological faculty of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Soil Science faculty of the Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Moscow State Autonomous Cultural Institution "Zaryadye Park"

Annotation: The task of formation a landscape analogs of all natural zones of the European territory of Russia from the tundra to subtropics in one small park in the center of Moscow was set. Proceeding from climatic conditions of the city, the chosen range of plants, recreational loading and the mode of visit of the park, the certain structure of a soil cover formed on a roof of underground constructions was offered. Creation of a soil and vegetable cover continued 1 year. In 2 months after completion of landings of plants the first determination of soil properties in various types of forest plantings was carried out.

Была поставлена задача формирования ландшафт-аналогов всех природных зон Европейской территории России от тундры до субтропиков в одном небольшом парке в центре г. Москвы. Исходя из климатических условий города, выбранного ассортимента растений, рекреационной нагрузки и режима посещения парка, была предложена определенная структура почвенного покрова, формируемая на крыше подземных сооружений. Создание почвенно-растительного покрова продолжалось 1 год. Через 2 месяца после завершения посадок растений были проведены первые определения почвенных свойств в различных типах лесных насаждений.

Введение

Парк «Зарядье» - самый центральный и самый молодой парк г. Москвы. Парк создавался в 2015-2017 гг. на месте снесенного здания гостиницы «Россия» на площади в 10 га. В соответствии с проектом, предложенным ландшафтным архитектором Мэри Маргарет Джонс (Mary Margaret Jones) и архитектором Чарльзом Ренфро (Charles Renfro) в Парке предусмотрено размещение следующих зон : тундра, лесная зона, луга и степи. Лесная зона разделена на 4 подзоны – хвойные леса (отдельно посадки сосен и елей), березовые рощи, широколиственные леса и пойменные леса. При создании сложно организованной структуры почвенно-растительного покрова нужно было соблюсти целый ряд требований, исходя из концепции закладываемого парка:

1. Создание условий для успешного роста и развития растений из разных климатических зон (от USDA 3 до 8) в условиях центра Москвы, относящихся к зоне USDA 5.
2. Решение проблемы выращивания природных растений в условиях загрязненной атмосферы центра города.
3. Следование предложенной архитекторами концепции безбарьерной среды, когда посетители парка имеют возможность свободно перемещаться по травянистому покрову.
4. Сжатые сроки создания. От посадки первых растений до открытия парка прошло менее 1 года, растения не успели укорениться и окрепнуть.

Ассортимент растений, как древесно-кустарниковых, так и многолетников, подбирался отдельно для каждого типа растительности. В основе подбора ассортимента заложен принцип



зональности растительности России. Проектируемые растения должны быть типичными для каждой из создаваемых природных зон Европейской части России и обладать высокими декоративными характеристиками. Основными задачами настоящей работы были: (1) разработка структуры почвенного покрова парка, по сути, представляющего собой сложно организованную почвенную конструкцию, (2) разработка технологию формирования почвенных конструкций в соответствии с заданным ассортиментом растений.

Объекты и методы

Парк «Зарядье» расположен в центральной части Москвы, внутри Бульварного кольца и ограничен улицами: Варварка, Китайгородский проезд, Москворецкая набережная и Москворецкой улицей. Общая площадь парка – около 10 га, из которых заняты зелеными насаждениями около 5 га.

При разработке почвенных конструкций необходимо соблюдение ряда нормативных документов, действующих на территории Москвы (1, 2, 3, 4).

Согласно конструктивным особенностям подземных сооружений парка «Зарядье», ограничений по мощности почвенного слоя не было. Подстилающим слоем почвенного покрова, расположенного непосредственно на крышах и поверхностях подземных сооружений и коммуникаций, явился уплотненный песок. На тех участках Парка, где отсутствовали подземные сооружения расположена нативная почва, представляющая собой легкосуглинистый и супесчаный урбаноземы.

Все деревья в Парке промаркированы и закартированы. В июле 2017 г. в конце работ по закладке Парка, было проведено выборочное определение водно-физических свойств почв на мониторинговых площадках следующих участков: с еловыми посадками (Ельник, участок между деревьями № 365-366-374-375), березовыми насаждениями (Березняк, участок между деревьями № 278-279-280 и 150-152-151-177) и посадками сосен (Сосняк, участок между деревьями № 210-211-212). Были измерены водопроницаемость и плотность почвы. Определение физических свойств почв исследуемых объектов проводили общепринятыми методами (Вадюнина, Корчагина, 1986; Воронин, 1986, Шеин и др., 2001, «Теории и методы», 2007): Плотность почвы буровым методом с объемом бура 80-100 см³, повторность для каждого определения – 3. Определения плотности были проведены трижды за исследуемый период: в апреле – в верхних горизонтах под кроной дерева и между деревьями, в конце мая – после подсыпки почвы в межкрупном пространстве и по профилю почвы в ельнике, в июле – профильное распределение плотности на всех 3-х исследованных участках (Березняке, Ельнике и Сосняке). Влажность почвы – термостатно-весовым методом. Повторность – 3. Гранулометрический состав был определен методом шнура и в лабораторных условиях в испытательном центре АНО «Независимый институт экспертизы и сертификации» по методу Н.А.Качинского (ГОСТ 12536-2014).

Результаты и обсуждение

При разработке технологии создания плодородного почвенного слоя в рамках весьма широких требований к почвогрунтам для городского озеленения согласно регулирующим документам выбирался более узкий диапазон, исходя из экологических требований растений разных зон Парка. Для формирования плодородного слоя во всех зонах кроме «тундры» используется почвогрунт заводского изготовления с заданными агрохимическими свойствами и гранулометрическим составом. Единственный участок, на котором агрохимические свойства почв исходно не могли соответствовать требованиям, предъявляемым к почвогрунтам, завозимым на территорию Москвы, стал участок Тундры.

Была предложена следующая *технология укладки плодородного слоя почвы*.



В соответствии с требованиями растений предложенная мощность плодородного слоя для участков с древесными насаждениями составила 1 м, для участков с кустарниками и травянистой растительностью – 50 см.

Мощность первого насыпанного поверх выравнивающего песка слоя составляла 15-20 см. При укладке плодородного почвенного слоя на его поверхности проводилась культивация для формирования переходного почвенно-песчаного слоя мощностью 10-15 см. Тем самым предотвращалось создание резких границ между песчаной подушкой и плодородным слоем почвы, препятствующих свободным вертикальным потокам влаги. В тех случаях, где поверх выравнивающего слоя насыпается слой щебня (ландшафтные аналоги степи и тундры) культивация не проводилась.

Далее было проведено прикатывание созданного переходного горизонта с его уплотнением до 1,3-1,4 г/см³. Согласно разработанными рекомендациям, оно должно проводиться в сухую погоду и по сухому почвогрунту. Следует отметить, что данное требование к укладке грунта не соблюдалось: прикатывание проводилось вне зависимости от погоды и часто по влажному грунту. Размещение почвогрунта проводилось слоями по 20 см с сопровождением его уплотнения до 1,2-1,3 г/см³. Для верхнего слоя почвогрунта была рекомендована плотность равная 1,1-1,2 г/см³.

Было предложено после окончания засыпки укрыть почвенную поверхность черным нетканым материалом типа агроспана для предотвращения попадания прорастания имеющихся в почве семян сорной растительности. В таком состоянии почва должна находиться 2-3 месяца в условиях регулярного полива (1 раз в 2 недели) нормой 100 мм водного сл. Кроме поддержания влажности почвы данная процедура направлена на оптимизацию плотности и порозности почвы.

Весьма важным вопросом при использовании подобных искусственно создаваемых почвенных субстратов является обогащение их мезофауной, обеспечивающей разложение растительных остатков, рыхления и перемешивания почвы было рекомендовано внесение дождевых червей. Для луговых ландшафтов были предложены виды *Aporrectodea caliginosa caliginosa* и *Aporrectodea rosea* из расчета 5 экз/кв.м. каждого, для участков с древесно-кустарниковой растительностью: *Lumbricus rubellus*, *Dendrobaena octaedra* и *Aporrectodea caliginosa caliginosa* в равном соотношении из такого расчета, чтобы всего было 10 экз/кв.м.

Были разработаны требования к почвогрунтам с учетом особенностей растительных сообществ и подземных сооружений.

На участках под создаваемой лесной (древесно-кустарниковой) растительностью рекомендовано формировать плодородный слой мощностью 1 м на песчаной основе и 0,2 м на урбаноземе с обязательной полной заменой грунта в посадочной яме. Мощность плодородного слоя под степной, луговой и прибрежной растительностью и под газоны рекомендуется создавать равной 0,5 м на песке и 0,2 м на почвенной толще.

Были разработаны специальные рекомендации для создания почвенного покрова в пределах каждой растительной зоны.

Тундра. Это самый сложный участок парка в условиях г. Москвы. Зональные почвы и урбаноземы города радикально отличаются по своим свойствам от тундровых почв. Для создания ландшафт-аналога необходимо приготовить специфический субстрат, который по своим характеристикам и влиянию на растения приближался бы к тундровым почвам.

В проекте можно выделить 2 разные зоны для растений, которые будут имитировать тундровую растительность: зона повышенного увлажнения (под ивами, болотной растительностью) и зона с хорошим дренажом и дефицитом влаги (под очитками, камнеломками и др. растениями, растущими на скалах).



Для зоны избыточного увлажнения было рекомендовано в нижнюю часть почвенного профиля расположить слой глины, как водоупор, имитирующий природный водоупор – вечную мерзлоту. Было предложено использовать бентонитовую глину мощностью 5 см, на поверхность которой укладывается субстрат мощностью от 0,2 (для низких травяных растений) до 0,4 м (для древесной растительности). Состав субстрата следующий: торф верховой 70%, песок крупнозернистый – 30%. Содержание органического вещества ($C_{орг}$) составил 30-50%, фосфора и калия 100-150 мг/кг, pH (KCl) 2,5-4.

Под очитки и другие почвопокровные растения, не выдерживающие переувлажнения, почвенный слой рекомендовано создавать следующим образом: на спланированную поверхность с уклоном не менее 2° насыпается 0,4 м слой гранитного щебня (фракции 20-40 мм), укладывается геотекстиль и укладывается 10 см слой гранитного щебня или гальки, в который высаживают растения в специальные посадочные места. В посадочное место добавляется плодородный субстрат следующего состава: легкий суглинок – 40%, крупнозернистый песок – 30%, торф верховой – 30%. Содержание органического вещества в субстрате должно составлять 10-20%, фосфора и калия - 100-200 мг/кг субстрата, pH (KCl) быть равным 4,5-5,5.

Следует разметить площадку в зависимости от типа высаживаемой растительности, затем сформировать плодородный слой для деревьев и кустарников, после этого засыпать оставшуюся часть щебнем и подготовить плодородный слой для посадки почвопокровных растений.

Ельник. Мощность почвенного слоя рекомендуется равным 1 м. Его гранулометрический состав - легкий суглинок, содержание $C_{орг}$ от 6 до 10 %, фосфора и калия 150-300 мг/кг почвы, pH (KCl) 5,0-6,0.

Сосняк. Мощность почвенного слоя – также 1 м. Гранулометрический состав – аналог почве ельника с добавлением крупнозернистого песка, 25%. Агрохимические параметры – аналогичны ельнику.

Широколиственный лес и березняк. Все параметры, за исключением кислотности – аналогичны ельнику, pH (KCl) 5,5-6,5.

Прибрежный лес. Мощность почвенного слоя 0,5 м - для кустарниковой и травяной растительности, для древесных культур – полная замена грунта в посадочной яме на глубину 1 м. Состав почвенного субстрата: 40% плодородный суглинок, 30% крупнозернистый песок, 30% низинный торф. Содержание органического углерода 10-20 %, фосфора и калия 200-300 мг/кг субстрата, pH (KCl) 5,5-6,5.

При посадке влаголюбивых растений (Белокопытник, калужница и др.) на дно посадочной ямы (на глубину 0,5 м) рекомендовано уложить слой бентонитовой глины толщиной 5 см для создания локального водоупора и повышения влажности почвы.

Суходольный луг. Мощность легкосуглинистого почвенного слоя: 0,5 м. Агрохимические показатели – аналогичны березняку, за исключением pH (KCl) равный 6,0-6,5. Для данного участка рекомендовано дополнительное внесение дождевых червей видов *Aporrectodea caliginosa caliginosa* и *Aporrectodea rosea* в количестве 5 экз/м² каждого вида.

Степь. Мощность почвенного слоя 0,8 м, из которых 0,3 м - слой известкового щебня фракцией 20-40 мм, сверху – 0,5 м слой почвенного субстрата легкосуглинистого состава с добавлением 10% известкового щебня фракцией 10-20 мм (для обогащения почвы кальцием и повышения pH). Содержание органического углерода 10- 15 %, фосфора и калия 200-400 мг/кг почвы, pH (KCl) 6,5-7,2. Для степи также рекомендовано внесение большего количества



дождевых червей вида *Aporrectodea caliginosa caliginosa* и *Aporrectodea rosea* в количестве 5 экз/м².

Обследование почвенного покрова Парка «Зарядье»

В июле 2017 г. были проведены обследования фактически получившихся почвенных профилей на территории отдельных экспозиций. Было установлено, что в мае-июне при проведении окончательной нивелировки территории и разметки дорожек была проведена досыпка почвогрунта до нулевых отметок.

В результате в Ельнике, Сосняке и Березняке мощность плодородного слоя приблизилась к заданной величине – 1 м (табл. 1). Во всех разрезах обнаружен переходный горизонт между плодородным почвогрунтом и песчаной отсыпкой, что способствует уменьшению явлений застоя влаги и образования воздушных пробок на границах контрастных по физическим свойствам слоев.

Таблица 1. Глубины и механический состав слоев почвогрунта в Березняке, Ельнике и Сосняке.

| Слои | Березняк | | Ельник | | Сосняк | |
|--------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|------------------|---|
| | см | гран.состав | см | гран.состав | см | гран.состав |
| Почва досыпанная | 0-25 (28) | Средний суглинок | 0-20 (26) | Тяжелый суглинок | 0-22 (28) | Средний суглинок |
| Почва – основной слой | 25-60 | Средний суглинок | 20-85 | Тяжелый суглинок | 22-60 60-80 | - Легкий суглинок - Тяжелый суглинок |
| Смесь почва-песок | 65-105 | Средний суглинок (опесчаненый) | 85-130 | Тяжелый суглинок (с прослоями песка) | 80-95 (слоистый) | Тяжелый суглинок с прослоями песка |
| Планировочный слой песка | >105 | Песок | > 130 | Песок | >95 | Песок |

В сосняке смешивание слоев было проведено не столь тщательно, что привело к формированию многочисленных тонких песчаных прослоек. Еще более пестрая картина сложилась в переходном горизонте почвы сосняка (табл.1), состоящего из тонких слоев песка и почвы. Отметим, что и его мощность в данном варианте составила всего 15 см на фоне тонкости песчаного слоя, с близким расположением крыши здания. Однако морфологических признаков переувлажнения в нижней части почвенной толщи не обнаружено, что обусловлено наличием выраженного склона данной территории. Это при поступлении больших объемов влаги ведет к формированию латеральных (поверхностных и внутрипочвенных) потоков влаги и их сбросу в дренажный сток. Определение гранулометрического состава методом шнура показало, что почвы всех исследованных площадок являются суглинистыми: от легкого до тяжелого суглинка (табл.1), с преобладанием среднесуглинистого состава. В целом почвенный покров по данному показателю имеет очень близкие показатели. Согласно полученным данным, наиболее неоднородным по гранулометрическому составу почвенным покровом обладает Сосняк. Почвы под Ельником представлены несколько более тяжелой почвой по грансоставу. В августе 2017 г. были взяты почвенные пробы из Ельника и Сосняка для лабораторного



определения гранулометрического состава. Почвы Ельника оказались более легкими, чем почвы Сосняка.

Плотность почвы. Плотность почвы характеризует возможности для создания оптимального соотношения влаги и воздуха в поровом пространстве почв. Кроме того, данный показатель отражает возможности проникновения корневых систем в почву. Диапазон оптимальных величин плотности определяется гранулометрическим составом: при увеличении содержания физического песка увеличиваются абсолютные значения оптимальной плотности и их диапазон. Определения плотности были проведены трижды за исследуемый период: в апреле – в верхних горизонтах под кроной дерева и между деревьями, в конце мая – после подсыпки почвы в межкронном пространстве и по профилю почвы в ельнике, в июле – профильное распределение плотности на всех 3-х исследованных участках.

Таблица 2. Плотность и влажность почвы в межкроновом пространстве (1) и почвенном коме (2). 27.04.2017

| | вариант | влажность, % | плотность г/см ³ | ср.знач плотности |
|-----------------|---------------|--------------|-----------------------------|-------------------|
| Березняк | 1 | 19,7 | 1,66 | 1,67 |
| | | 20,5 | 1,68 | |
| | | 20,5 | 1,67 | |
| | 2 | 24,9 | 1,44 | 1,45 |
| | | 27,1 | 1,33 | |
| | | 22,0 | 1,57 | |
| Ельник | 1 | 27,7 | 1,50 | 1,52 |
| | | 24,8 | 1,55 | |
| | | 25,5 | 1,51 | |
| | 2 | 29,2 | 1,36 | 1,42 |
| | | 27,1 | 1,47 | |
| | | 28,9 | 1,43 | |
| Сосняк | 1 | 25,4 | 1,49 | 1,52 |
| | | 23,5 | 1,57 | |
| | | 26,9 | 1,49 | |
| | 2 | 20,8 | 1,38 | 1,46 |
| | | 17,4 | 1,51 | |
| | | 17,5 | 1,51 | |
| Липняк | | 40,4 | 1,12 | 1,08 |
| | | 42,4 | 1,07 | |
| | | 42,9 | 1,04 | |
| Старый Березняк | посадка крона | 28,6 | 1,39 | 1,35 |
| | | 28,1 | 1,37 | |
| | | 29,2 | 1,28 | |
| | старое дерево | 32,7 | 1,30 | 1,34 |
| | | 22,4 | 1,35 | |
| | | 23,1 | 1,36 | |

Определение плотности и влажности почвы **в конце апреля** показало, что верхние горизонты почв в межкроновом пространстве территорий с искусственными посадками оказались переуплотнены (табл.2), что обусловлено постоянными заездами строительной техники и перемещением рабочих по влажной почве.

Особенно сильное переуплотнение наблюдалось в почве березняка. Согласно классификации Бондарева А.Г. почвы являлись неудовлетворительными по данному свойству весной 2017 г после проведения посадочных работ. В комах растений значения плотности ниже, но при этом разброс значений выше, т.е. в большей степени выражена пространственная неоднородность почвенной толщи комов. Обращает внимание то, что



плотность почвенного кома сосны выше, что, вероятно, связано с более легким гранулометрическим составом почвы внутри кома. Почва в исследуемый период не была переувлажнена. Обращает на себя внимание то, что в березняке и ельнике влажность почвы под деревьями была выше, чем между их кронами, в отличие от сосняка, в котором комы деревьев были более иссушены.

На следующем этапе работ, *проведенных в июле*, были исследованы профильные распределения плотности почвы. Во всех вариантах обнаружено переуплотнение поверхностного слоя, снижение плотности на глубине 10-40 см, постепенное нарастание величин с глубиной, закономерно резкое увеличение значений при переходе к подстилающему песку в соответствии с гранулометрическим составом (рис. 1). Обратим внимание на то, что в ельнике сохранилась дифференцированность профиля со значимым увеличением значений в поверхностном слое. В Сосняке и Ельнике средняя часть профиля близка к оптимальным, а в Березняке весь профиль переуплотнен, что связано с проведением работ по прокладке коммуникаций.

Была проанализирована динамика изменения плотности дневной поверхности почв. Поверхность почвы березняка в начале вегетационного периода в апреле была чрезвычайно переуплотнена – медианные значения составили 1,67 г/см³ (табл.3), причем разброс значений в межкрановом пространстве очень маленький.

Таблица 3. Динамика медианных значений и разброса значений плотности поверхностных горизонтов в исследуемый период

| | Березняк | | Ельник | | Сосняк | |
|-----------|-------------|------------------|---------|------------------|-------------|------------------|
| | медиана | разброс значений | медиана | разброс значений | медиана | разброс значений |
| 27 апреля | 1,67 | 0,02 | 1,51 | 0,05 | 1,49 | 0,08 |
| 31 мая | 1,37 | 0,13 | 1,53 | 0,08 | 1,53 | 0,08 |
| 22 июля | 1,54 | 0,11 | 1,56 | 0,05 | 1,62 | 0,06 |

После досыпки почвы плотность почвы приблизилась к оптимальным на фоне их высокого варьирования, однако через два месяца опять достигла критических значений, что обусловлено в первую очередь антропогенной нагрузкой на территорию на фоне постоянного атмосферного увлажнения. Наиболее стабильные значения плотности в Ельнике. Постепенное уплотнение в течение исследуемого периода наблюдалось в почве Сосняка, что во многом связано с высокой активностью проводимых в тот период строительных работ.

Таким образом, определения плотности почвы выявили проблемную ситуацию в верхнем горизонте всех участков, которая может быть устранена как путем проведения механической обработки почвы, высевам травянистых растений, действие почвенной фауны и естественными процессами разуплотнения в зимний период. Переуплотнение в средней части профиля требует разработки специальных мероприятий по снижению и устранению данного фактора. Отметим, что важное значение имеют свойства подстилающего слоя: его плотность и ровность границы. Проведенные исследования показали, что вероятно весьма проблемным участком может оказаться Березняк, т.к. укладка верхнего слоя производилась на переуплотненную почву с очень низкой водопроницаемостью в отсутствие внутрипочвенного уклона. Сосняк, несмотря на обнаруженное переуплотнение, имеет выраженный внутрипочвенный рельеф, присутствовали колеи от прохождения техники, создающие некую «гофрированность» данной поверхности в направлении склона. Это ведет



к увеличению расхода влаги на полив, опасности переувлажнения нижних частей склона вследствие формирования латеральных потоков влаги. В Ельнике наиболее благоприятная обстановка, несмотря на несколько повышенные значения плотности и влажности верхнего слоя, что легко устранимо.

Выводы

В целом удалось соблюсти рекомендации по устройству плодородного слоя почвы. Отсутствие резких переходов по гранулометрическому составу и плотности между почвенными слоями позволяет надеяться на то, что со временем насыпной слой будет работать как природная почва.

Рекомендации по технологии создания плодородного слоя давались из расчета укладки почвогрунта в летний период 2016 г. Однако, перенос начала работ по формированию почвенного покрова на осень и проведение основной работы в холодный влажный период – с октября 2016 г по начало июня 2017 г привело к переувлажнению почв. В этих условиях почвы особенно чувствительны к механическим воздействиям, что привело к внутрисочвенному и поверхностному переуплотнению, с одной стороны. А с другой, к формированию дифференцированности и слоистости профиля с чрезвычайно высокой степенью мозаичности и пространственной неоднородности почвенного покрова. Это провоцирует условия для образования локальных переувлажненных участков на разных глубинах почвенного покрова.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

1. Постановление Правительства Москвы №514-ПП от 27.07.2004 г. <http://mtsk.mos.ru/Handlers/Files.ashx/Download?ID=11122>
2. СанПиН 42-128-4433-87 «Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве». <http://www.alppp.ru/law/zdravoohranenie--fizicheskaja-kultura-i-sport--turizm/zdravoohranenie/62/sanitarnye-normy-dopustimyh-koncentracij-himicheskikh-veschestv-v-pochve--sanpin-42-128-443.pdf>
3. ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве», <http://docs.cntd.ru/document/901966754>
4. МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». <http://docs.cntd.ru/document/1200003852>
5. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. // М., “Высшая школа”, 1986, 416 с.
6. Теории и методы физики почв / Под ред. Шеина Е.В., Карпачевского Л.О. Тула: Гриф и К, 2007. 616 с



УДК 631.4

ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВАХ ТЕРРИТОРИИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Сушкова С.Н., Дудникова Т.С., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Барбашев А.И., Попилешко Я.А.,
Дорохова Н.А., Дерябкина И.Г.

Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета, г.
Ростов-на-Дону
snsushkova@sfedu.ru

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) - токсичные соединения, практически нерастворимые в воде, имеют высокую температуру кипения и устойчивы в окружающей среде. Подлежат обязательному контролю, однако в России ПДК разработано только бенз(а)пирена (БаП). Источниками антропогенных ПАУ в окружающую среду являются предприятия энергетического комплекса. Объект исследования: ОАО "ОГК-2" Новочеркасская ГРЭС (НчГРЭС) (предприятие первого класса опасности). Доля выбросов НчГРЭС по ЮФО составляет около 60% и 1% по всей России (90 тысяч тонн в год). Почвенный покров территории, прилегающей к НчГРЭС, представлен: 1) черноземами обыкновенными (ЧО) с содержанием физической глины 53%; 2) лугово-черноземными почвами (ЛЧ), где содержание физической глины составило 67%; 3) аллювиально-луговыми почвами (АЛ) с 7% физической глины. Отбор проб проводили методом конверта на глубину основного корнеобитаемого слоя (0-5 и 5-20 см) в 2018 г. Почву предварительно доводили до воздушно сухого состояния и пропускали через сито 1 мм. Содержание индивидуальных ПАУ в почве определяли методом омыления РД 52.10.556-95 (РД 52.10.556-95, 2002). Количественно определяли концентрацию ПАУ в экстракте методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Концентрацию ПАУ в анализируемых образцах рассчитывали по методу внешнего стандарта (абсолютной калибровки). Полученные результаты обработаны методами математической статистики (Таблица 1).

Исследования показали, что содержание всех ПАУ в слое 0-5 см выше, чем в слое 5-20 см. Для ЛЧ почв содержание всех ПАУ чуть выше, чем для почв ЧО и значительно выше, чем у АЛ почв. Максимальное содержание ПАУ отмечается в ЛЧ почвах и составляет 441,7 нг/г (22,5 ПДК) в слое 0-5 см. Таким образом, проведенные исследования показали влияние физико-химического состава почв на накопление в них ПАУ. Выявлено существенное превышение содержания БаП для ЛЧ и ЧО почв.



Таблица 1. Содержание ПАУ в почвах импактной зоны НчГРЭС

| № | Почва | Глубина отбора, см | ПАУ, нг/г | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|--------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| | | | Нафталин | бифенил | флуорен | фенантрен | антрацен | флуорантен | пирен | бенз(а)антрацен | бенз(б)флуорантен | бенз(к)флуорантен | бенз(а)пирен | дибенз(а,в)антрацен | бенз(г,х,и)перилен |
| 1 | АЛ | 0-5 | 1,6 ±0,05 | 10,9 ±0,4 | 6,5 ±0,2 | 93,6 ±2,7 | 9,4 ±0,3 | 96,9 ±3 | 71,5 ±2 | 55,7 ±1,5 | 79,3 ±2,2 | 28,1 ±1,2 | 53,5 ±1,6 | 38,7 ±0,7 | 100,8 ±3,2 |
| | | 5-20 | 0,6 ±0,02 | 8,8 ±0,3 | 3,9 ±0,1 | 68,4 ±2 | 2,4 ±0,08 | 63,8 ±2,5 | 70,5 ±2,1 | 40,7 ±1,3 | 50,1 ±1,5 | 17,0 ±0,9 | 40,7 ±1,5 | 23,2 ±0,5 | 84,8 ±2,6 |
| 2 | ЛЧ | 0-5 | 13,7 ±0,5 | 89,9 ±2,5 | 50,8 ±1,3 | 790,7 ±24 | 78,0 ±2,9 | 755,8 ±30,2 | 604,4 ±26,3 | 459,9 ±20,8 | 618,5 ±17,8 | 237,5 ±6,5 | 441,7 ±15,8 | 301,5 ±10,8 | 851,6 ±24,5 |
| | | 5-20 | 4,6 ±0,15 | 73,0 ±2,4 | 30,4 ±1 | 533,3 ±21,2 | 18,8 ±0,9 | 497,4 ±24,7 | 550,1 ±23,8 | 317,3 ±10,4 | 390,9 ±8,6 | 132,7 ±4,7 | 317,8 ±10,4 | 180,9 ±6,5 | 661,1 ±15,4 |
| 3 | ЧО | 0-5 | 10,5 ±0,4 | 70,8 ±2,4 | 42,3 ±1,2 | 608,2 ±22,5 | 61,4 ±22,7 | 629,8 ±27,5 | 464,9 ±22,8 | 362,2 ±11,5 | 515,4 ±16,1 | 182,7 ±5,3 | 347,8 ±11,2 | 251,3 ±7,1 | 655,1 ±14,4 |
| | | 5-20 | 3,8 ±0,1 | 57,5 ±1,5 | 25,3 ±1 | 444,4 ±15,4 | 15,6 ±0,7 | 414,5 ±23,1 | 458,4 ±22,5 | 264,4 ±8,6 | 325,7 ±8,8 | 110,6 ±3,6 | 264,8 ±7,6 | 150,8 ±4,5 | 550,9 ±13,4 |

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке базовой части гос. задания Министерство образования и науки РФ, № 6.6222.2017/8.9, Гранта Президента РФ № МК-2973.2019.4 и ведущей научной школы № НШ-3464.2018.11.



УДК 582.282.23; 574.2

РАЗНООБРАЗИЕ ДРОЖЖЕВЫХ СООБЩЕСТВ ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Тепеева А.Н.¹, Глушакова А.М.¹, Качалкин А.В.¹

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
sasha211092@inbox.ru

THE DIVERSITY OF YEAST COMMUNITIES OF URBAN SOILS

Tepeeva A.N.¹, Glushakova A.M.¹, Kachalkin A.V.¹
Faculty of Soil Science MSU, Moscow, Russian Federation

Annotation: Yeast abundance and diversity was studied in the soils of Moscow under lawn vegetation, near the heating mains, close to the areas of household waste disposal, in soils across highways, as well as in zonal soddy-podzolic soils in parks (Losinyi ostrov and Izmailovo). The numbers of soil yeasts were similar in all studied urban biocenoses (on average $\sim 6 \times 10^3$ CFU/g). From all studied soils 86 yeast species were isolated. The highest yeast diversity was found in the soils adjacent to the areas of household waste storage. Soils from different urban sites were found to have different ratios of ascomycetous and basidiomycetous yeasts. In urban soils with high anthropogenic load, the frequency of occurrence of clinically important yeast species (*Candida parapsilosis*, *C. tropicalis*, *Diutina catenulata*, and *Pichia kudriavzevii*) was as high as 35% of all studied samples, while its share in the community was 17%.

Благодаря многочисленным исследованиям к настоящему времени накопились значительные сведения об особенностях распространения дрожжевых грибов в почвах разных природных биоценозов умеренных широт (Максимова, Чернов, 2004; Чернов, 2013; Глушакова и др., 2015; Botha, 2006; Yurkov et al., 2015; Yurkov, 2017). Почвы городов существенно отличаются от природных по интенсивности и виду воздействия антропогенных факторов (Герасимова и др., 2003). Бактериальные сообщества и группировки микромицетов городских почв были неоднократно изучены (Марфенина, 2005; Лысак, 2010), в то время как исследований численности и таксономической структуры дрожжевых сообществ городских почв к настоящему моменту не проводилось.

Проведено исследование численности и разнообразия дрожжевых грибов в городских почвах (верхний гумусовый горизонт) г. Москвы: под газонной растительностью (урбаноземы и рекреаземы), рядом с локальными зонами размещения бытовых отходов (урбаноземы и рекреаземы), в зонах теплотрасс (реплантоземы), в придорожных зонах городских автомагистралей (реплантоземы), а также в дерново-подзолистых почвах на территории природных парков (Лосинный остров и Измайлово). Всего проанализировано 1084 почвенных образцов.

Таксономический состав дрожжевых грибов изучали стандартным методом посева на глюкозо-пептонно-дрожжевую среду с добавлением левомецетина (500 мг/л) для предотвращения роста бактерий. Видовую идентификацию дрожжевых грибов проводили на основе анализа нуклеотидных последовательностей D1/D2 доменов региона 26S (LSU), а также, при необходимости, ITS1-5.8S-ITS2 региона рДНК.

Всего в ходе работы были получены 3248 изолятов, которые на основании фенотипических характеристик были сгруппированы в 249 морфотипов, генетическая идентификация которых позволила обнаружить 86 видов (34 аскомицетового аффинитета, 52 – базидиомицетового). Большую часть составили минорные виды с низкой долей встречаемости и низкими показателями обилия. К постоянным обитателям почв г. Москвы, встречающихся в четырех и более из исследованных зон (биоценозов), можно отнести 10



видов: *Candida sake*, *Cystofilobasidium capitatum*, *Cystofil. infirmominiatum*, *Cystofil. macerans*, *Debaryomyces hansenii*, *Goffeuzyma gastrica*, *Naganishia adeliensis*, *Rhodotorula glutinis*, *Solicoccozyma terreus*, *Tausonia pullulans*.

Численность дрожжей в верхнем гумусовом горизонте составила в среднем 6×10^3 КОЕ/г. Встречаемость дрожжей во всех образцах почв была около 100% за исключением почвы природного парка (Измайлово), где только в 70% исследованных образцов численность дрожжей была выше разрешающей способности метода посева.

В ходе исследования дрожжевых сообществ зон теплотрасс обнаружено 25 видов дрожжей. Подавляющее большинство выделенных видов относилось к базидиомицетам. Среди аскомицетов обнаружено только 3 вида: *Aureobasidium pullulans*, *C. sake* и *Deb. vindobonensis*. Полученные ранее результаты исследования почвенных дрожжевых грибов ненарушенных лесных и луговых фитоценозов Москвы и Московской области демонстрировали постоянное присутствие аскомицетовых видов *Barnettozyma californica*, *Wickerhamomyces anomalus*, а также представителей родов *Schwanniomyces* и *Debaryomyces* (Глушакова и др., 2015). Низкое разнообразие аскомицетов, характерное для моховых дернин (Качалкин и др., 2008), может являться свидетельством внесения торфа в городские почвы.

Для дрожжевых сообществ зон теплотрасс была характерна высокая выравненность дрожжевых сообществ и отсутствие ярко выраженных доминантов (индекс Пиелу 0,89) по сравнению с фоновыми почвами (индекс Пиелу 0,56), что указывает на достаточно благоприятные условия развития дрожжевых грибов в подобных условиях. Дополнительное поступление тепла в городскую почву вызывает увеличение разнообразия дрожжевого населения и уменьшение доли краснопигментированных видов (Тепеева и др., 2018 (а)).

Наибольшее видовое разнообразие дрожжей было обнаружено при исследовании городских почв, примыкающих к придомовым зонам складирования бытовых отходов. Среди выделенных видов преобладали базидиомицетовые дрожжи. Наиболее обильными видами были *Barn. californica*, *C. parapsilosis*, *C. sake*, *Diuina catenulata*, *Goff. gastrica* и *Tausonia pullulans*. При этом только 4 из них можно отнести к характерным для почвенных местообитаний видам – *Barn. californica*, *C. sake*, *Goff. gastrica*, *Ta. pullulans*. Виды *C. parapsilosis* и *Diut. catenulata* относятся к группе клинически значимых видов. К клинически значимым видам дрожжей, выделенных в исследуемых точках, также относятся *C. tropicalis* и *P. kudriavzevii*, однако они обнаруживались реже и не во всех точках отбора проб. В ходе исследования клинически значимые виды дрожжей встречались в 35% исследованных образцов, их обилие достигало значения 17 %. Также были обнаружены виды *Naganishia albida*, *Rh. mucilaginoso*, *Na. adeliensis*, *Deb. hansenii*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Torulasporea delbrueckii*, которые могут выступать в роли возбудителей микозов у лиц с различными нарушениями иммунобиологической резистентности. Значение обилия данных видов было менее 3 % (Тепеева и др., 2018 (б)).

Установлено, что структура почвенных дрожжевых комплексов значительно изменяется в зонах воздействия автотранспортного загрязнения. При удалении от автомагистрали изменяется спектр дрожжей-доминантов, уменьшается доля устойчивых к загрязнению пигментированных видов, возрастает относительное обилие вида *Solicoccozyma terreus* – постоянного компонента почвенных дрожжевых комплексов природных биогеоценозов.

Сравнительный анализ структуры видового разнообразия почвенных дрожжевых сообществ различных функциональных зон г. Москвы показал значительные различия в разнообразии дрожжевого населения типичных городских почв (урбаноземы, реплантоземы, рекреаземы) и дерново-подзолистых почв природных парков, которые в меньшей степени подвергались антропогенной нагрузке и находились под действием зонально-климатических



факторов почвообразования (табл. 1). Выявлено, что в городских почвах с высокой антропогенной нагрузкой формируются более разнообразные по видовому составу дрожжевые сообщества: число видов, обнаруживаемых в подобных почвах, примерно в два раза превышает число видов в почвах природных парков г. Москвы. Заметно различаются виды-доминанты и типичные виды в структуре почвенных дрожжевых сообществ. Принципиальным отличием дрожжевых сообществ городских почв было минимальное присутствие типичных почвенных видов из родов *Solicoccozyma* и *Apiotrichum*, а также отсутствие типичного почвенного вида дрожжей *Saitozyma podzolica*, которые обычно обнаруживаются среди доминантов в почвах природных парков (табл. 1).

Таблица 1. Структура почвенных дрожжевых сообществ различных зон г. Москвы.

| Газоны | Зоны теплотрасс | Зоны размещения отходов | Зоны автомагистралей | Луг | Лес |
|---|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Ранжированный список видов дрожжей с показателями относительного обилия более 5 % | | | | | |
| <i>Naganishia cerealis</i> | <i>Cystofilobasidium capitatum</i> | <i>Tausonia pullulans</i> | <i>Naganishia adeliensis</i> | <i>Torulaspora delbrueckii</i> | <i>Saitozyma podzolica</i> |
| <i>Cystofilobasidium capitatum</i> | <i>Naganishia albidosimilis</i> | <i>Barnettozyma californica</i> | <i>Rhodotorula glutinis</i> | <i>Saitozyma podzolica</i> | <i>Apiotrichum porosum</i> |
| <i>Naganishia albidosimilis</i> | <i>Naganishia cerealis</i> | <i>Candida sake</i> | <i>Cystofilobasidium macerans</i> | <i>Apiotrichum porosum</i> | <i>Apiotrichum laibachii</i> |
| <i>Debaryomyces vindobonensis</i> | <i>Papiliotrema flavescens</i> | <i>Candida parapsilosis</i> | <i>Mrakia frigida</i> | <i>Wickerhamomyces anomalus</i> | <i>Solicoccozyma terricola</i> |
| <i>Mrakia aquatica</i> | <i>Tausonia pullulans</i> | <i>Diutina catenulata</i> | <i>Holtermanniella takashimae</i> | <i>Schwanniomyces castellii</i> | <i>Solicoccozyma terreus</i> |
| <i>Tausonia pullulans</i> | <i>Aureobasidium pullulans</i> | <i>Goffeauzyma gastrica</i> | <i>Schwanniomyces capriottii</i> | <i>Diutina catenulata</i> | |
| <i>Goffeauzyma gastrica</i> | <i>Leucosporidium scottii</i> | | | | |
| <i>Cystofilobasidium macerans</i> | <i>Mrakia aquatica</i> | | | | |
| Число видов | | | | | |
| 33 | 25 | 33 | 27 | 15 | 7 |
| Индекс разнообразия Шеннона | | | | | |
| 2,2 | 2,6 | 2,9 | 2,2 | 2,7 | 2,0 |
| Доля аскомицетовых дрожжей, % | | | | | |
| 14,2 | 12,0 | 42,4 | 17,9 | 57,6 | 0,8 |
| Доля базидиомицетовых дрожжей, % | | | | | |
| 85,8 | 88,0 | 57,6 | 82,1 | 42,4 | 99,2 |
| Доля пигментированных видов, % | | | | | |
| 10,2 | 9,1 | 9,1 | 4,5 | 3,4 | 0 |
| Средняя численность, lg (КОЕ/г) | | | | | |
| 3,3±0,4 | 3,7±0,2 | 3,7±0,3 | 4,1±0,5 | 3,9±0,8 | 3,6±1,4 |

Более широкий видовой спектр видов дрожжей в городских почвах, вероятно, является результатом комплексного антропогенного воздействия, включающего внесение торфокомпостных смесей, очаговое разложение органических остатков, различные типы загрязнений. Все эти факторы ведут к формированию дополнительных локусов для развития дрожжей в урбаногемах. Почвы разного типа землепользования различаются также по



соотношению аскомицетовых и базидиомицетовых дрожжей: в городских почвах под газонной растительностью, в зонах теплотрасс, в зонах городских автомагистралей, как и в дерново-подзолистых почвах под лесом, доминируют базидиомицеты, тогда как в урбаногемах рядом с локальными зонами размещения бытовых отходов и в почвах под лугом увеличивается доля аскомицетов (Тепеева и др., 2018 (в)) (табл. 1).

Проведенное нами исследование показало, что численность и видовая структура почвенных дрожжевых сообществ в городских условиях заметно трансформируются под воздействием различных антропогенных факторов: повышение температуры, хозяйственно-бытовое загрязнение, автотранспортное загрязнение, тип землепользования. Антропогенный фактор выступает в качестве важного регулятора видового разнообразия и структуры почвенного дрожжевого комплекса и значительно преобразовывает городские экосистемы.

Проведенное исследование может быть использовано для биодиагностики, биоиндикации и оценки рисков возникновения микозов в городе.

Литература:

1. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Учебное пособие. Под ред. академика РАН Добровольского Г.В. М.: Ойкумена, 2003. 270 с.
2. Глушакова А.М., Качалкин А.В., Чернов И.Ю. Влияние инвазионных видов травянистых растений на структуру почвенных дрожжевых комплексов смешанного леса на примере *Impatiens parviflora* DC // Микробиология. 2015. Т. 84, № 5. С. 606–611.
3. Качалкин А.В., Глушакова А.М., Юрков А.М., Чернов И.Ю. Особенности дрожжевых группировок в филлосфере сфагновых мхов // Микробиология. 2008. Т. 77. № 4. С. 533–541.
4. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв. Автореф. дисс. докт. биол. наук. М., 2010. 46 с.
5. Максимова И.А., Чернов И.Ю. Структура сообществ дрожжевых грибов в лесных биогеоценозах // Микробиология. 2004. Т. 73. № 4. С. 558–556.
6. Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
7. Тепеева А.Н., Глушакова А.М., Качалкин А.В. Влияние городских теплотрасс на дрожжевые сообщества почв // Почвоведение. 2018 (а). № 4. С. 486–492.
8. Тепеева А.Н., Глушакова А.М., Качалкин А.В. Влияние локальных зон размещения отходов на дрожжевые сообщества городских почв // Гигиена и санитария. 2018 (б). Т. 97, № 1. С. 50–53.
9. Тепеева А.Н., Глушакова А.М., Качалкин А.В. Особенности дрожжевых сообществ почв города Москвы // Микробиология. 2018 (в). Т. 87, № 3. С. 303–313.
10. Чернов И.Ю. Дрожжи в природе. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2013. 336 с.
11. Botha A. Yeasts in soil // Biodiversity and ecophysiology of yeasts. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. P. 221–241.
12. Yurkov A. Yeasts in Forest Soils. Yeasts in Natural Ecosystems: Diversity. Eds. Buzzini P., Lachance M.-A., Yurkov A. Springer, 2017. P. 88–116.
13. Yurkov A., Inácio J., Chernov I.Y., Fonseca A. Yeast biogeography and the effects of species recognition approaches: the case study of widespread basidiomycetous species from birch forests in Russia // Curr. Microbiol. 2015. №70. P. 587–601.



УДК 631.4

РЕМЕДИАЦИЯ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ПОЧВ: ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

^{1,2}Трегубова П.Н., ¹Копцик Г.Н., ¹Степанов А.А.

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, Ленинские горы, д.1, стр. 12, Москва

²Сколковский институт науки и технологий, Центр по научным и инженерным вычислительным технологиям для задач с большими массивами данных, ул. Нобеля, д. 3, д. Сколково
tregubova.polin@gmail.com

REMEDIATION OF DEGRADED SOILS: EFFECT OF ORGANIC APPLICANTS ON PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS CONTAMINATED BY HEAVY METALS

^{1,2}Tregubova P.N., ¹Koptsik G.N., ¹Stepanov A.A.

¹Lomonosov Moscow State University,

Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1-12

²Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia, 121205, Moscow, Moscow Region, Nobelya, 3.

Annotation: In model experiment influence of different organic applicants (coal humate, peat-gel, biochar) and mineral ameliorants on chemical, physical and biological properties of soils on different stage of degradation has been shown. We can conclude, that these organic applicants may be suitable for remediation of soils, contaminated by heavy metals.

Введение

Загрязнение биосферы тяжелыми металлами (ТМ) – одна из наиболее острых проблем антропогенной нагрузки на окружающую среду (Мотузова, Карпова, 2013; Копцик, 2014). Находящиеся в Мурманской области заводские комплексы Кольской горно-металлургической компании (ГМК) -- «Печенганикель» и «Североникель» -- входят в число крупнейших загрязнителей окружающей среды в Северной Европе (Kozlov, Varcan, 2000; Копцик и др., 2016; Кашулина, 2002). В результате газопылевых выбросов диоксида серы, никеля и меди пространства, прилегающие к заводским комплексам, представляют собой глубоко нарушенные экосистемы, нуждающиеся в восстановлении.

Цель работы: оценка влияния наиболее перспективных препаратов и минеральных добавок на свойства почв техногенных пустошей ГМК «Североникель» и состояние тест-культуры при разной степени загрязнения в модельном эксперименте.

Задачи эксперимента: сравнить эффект от внесения угольных гуматов, торфогеля, извести, азофоски, микоризной инфекции и биочара на свойства почв участков МП2003/6 и МП2007/8. В качестве тест-культуры была высеяна овсяница красная, *Festuca rubra*. Период предварительной инкубации составил 30 дней, длительность эксперимента – 90 дней.

Объекты и методы

Объект исследования

Эксперимент был проведен на почвах участков техногенной пустоши, находящихся на разном расстоянии от комбината, и, следовательно, на разной стадии деградации. Первый участок - абразем альфегумусовый иллювиально-многогумусовый супесчаный на моренных



отложениях. Профиль представлен выходящим на поверхность в результате развития эрозии иллювиальным горизонтом BF, переходным BC и почвообразующей породой C. Координаты участка 67°56.457' с.ш. 32°50.074' в.д.

Второй участок подзол иллювиально-железистый химически загрязненный. Профиль представлен маломощной подстилкой Oe, периодически выходящим на поверхность горизонтом BF, переходным BC и почвообразующей породой C. Координаты участка 67°57.901' с.ш. 32°50.373' в.д.

Эксперимент был проведен на образцах горизонтов BF абразема и подзола (табл.1).

Таблица 1. Некоторые свойства почв пустошей: pH_{H_2O} - pH водной вытяжки, Н – гидролитическая кислотность (ммоль(+)/кг), ТС – общий углерод (%), валовое содержание и содержание водорастворимых форм тяжелых металлов (средние и доверительные интервалы при $p < 0.05$)

| Почва | от ГМК, км | Горизонт | pH_{H_2O} | Н ммоль(+)/кг | ТС % | Ni мг/кг | Cu мг/кг |
|---------|---------------|----------|-------------|------------------|---------|-----------------------|-------------|
| Абразем | 2 | BF | 4.9±0.8 | 3.4±0.3 | 1.4±0.1 | Валовые формы | |
| | | | | | | 271±16 | 347±19 |
| | | | | | | Водорастворимые формы | |
| | | | | | | 8.1±1.5 | 28.9±4.9 |
| Подзол | 5 | BF | 5.6±0.4 | 3.4±0.3 | 1.0±0.1 | Валовые формы | |
| | | | | | | 86±6 | 143±10 |
| | | | | | | Водорастворимые формы | |
| | | | | | | 5.0±0.4 | 6.2±0.8 |

Использованные препараты

Таблица 2. Краткое описание внесенных добавок

| Добавка | Шифр | Описание | Способ внесения |
|---------------------------|------|--|---|
| Гумат К/Na, “Экстра” | CH | Щелочная экстракция ОВ из бурого угля | В растворе |
| Торфогель “Humic Land” | PG | Кавитационная диспергация торфа в водной. среде | В растворе |
| Биочар “BioSannie” | BC | Пиролиз древесного угля | В сухом виде |
| Микориза | M | <i>Glomus intraradices</i> , <i>G. mosseae</i> , <i>G. aggregatum</i> , <i>G. etunicatum</i>) | В сухом виде |
| Азофоска | * | | NPK 16:16:16 В растворе |
| Карбонат кальция | L | Минеральные добавки | Из гидролитической кислотности; В сухом виде |

В соответствии с результатами проведенных ранее экспериментов (Tregubova et al., 2017), органические добавки вносились в количестве 0.5% углерода к массе почвы. Почвы



подзола и абразёма, в которые вносилась только азофоска, использовались как контрольные варианты (К*).

Методы

Эксперимент проводили в контролируемых условиях в климатической камере Binder с режимом освещения, имитирующим полярный день при температуре и влажности, характерных для летнего сезона в Мончегорском районе согласно данным с сайта «Расписание погоды» (<https://rp5.ru>). В данной работе приведены оцененные по окончании эксперимента состояние надземной и подземной частей тест-культуры: длина, фитомасса; общее содержание углерода, азота (методом сухого сжигания на CHNS-анализаторе ThermoFisher Flash-2000), ТМ в корнях и побегах растений и содержание водорастворимых форм ТМ в почвах (с помощью масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на ICP MS 7500a, Agilent), кинетика сушки почв, оцененная на анализаторе влажности MS-70 (A&D, Япония) в соответствии с рекомендациями (Практикум по физике твердой фазы почв, 2017).

Результаты и обсуждение

Химические свойства почв

Кратко обратимся к изменению основных химических почвенные характеристик по прошествии эксперимента (данные на графиках не представлены). Значения рН водной вытяжки контрольных вариантов составляют 4.7 и 5.6 для участков подзола и абразема соответственно, с внесением всех добавок рН значительно повышается с максимумами в вариантах с угольным гуматом и CaCO_3 (до 6.5). Общее содержание углерода равно 1.4% и 1.0%, азота – 0.07-0.08%, с соотношением C/N, лежащим в диапазоне от 15 до 20. Со внесением органических добавок общее содержание углерода увеличивается на 0.5% в среднем, что отвечает выбранным при постановке эксперимента дозировкам. Общее содержание азота значительно не изменяется.

Содержание водорастворимых Ni и Cu в почвах и фитотестирование

Для контрольных вариантов характерно содержание Ni в среднем 8 и 6 мг/кг, Cu – 28 и 6 мг/кг, в абраземе и подзоле, соответственно (рис.1). Относительно них в вариантах опыта произошло заметное снижение содержания Ni, Cu и Co – всюду, однако с разной степенью интенсивности: эффект стабилизации убывает в ряду угольный гумат \geq CaCO_3 $>$ биочар $>$ торфогель на почвах абразема. На почвах подзола биочар и торфогель значительно снижают содержание водорастворимых Ni и Cu. Контрольные варианты почв обоих участков характеризуются очень слабым прорастанием тест-культуры при отсутствии корневой системы. На почвах абразема тест-культура проросла относительно равномерно между вариантами с внесением угольного гумата, CaCO_3 и биочара – прирост суммарной фитомассы от 40 до 50 г/м² (с учетом побегов и корней). Торфогель для этого участка демонстрирует сниженную в два раза эффективность в сравнении с остальными добавками. Для почвы участка подзола наиболее эффективными добавками являются биочар и известь, дающие прирост фитомассы от 80 до 100 г/м – в остальных вариантах он распределен без значимых различий в диапазоне от 45 до 70. При этом столь значительная разница в фитомассе в условиях близкого содержания водорастворимых ТМ в почвах может быть обусловлена основным участием именно сорбционных центров в механизме стабилизации.

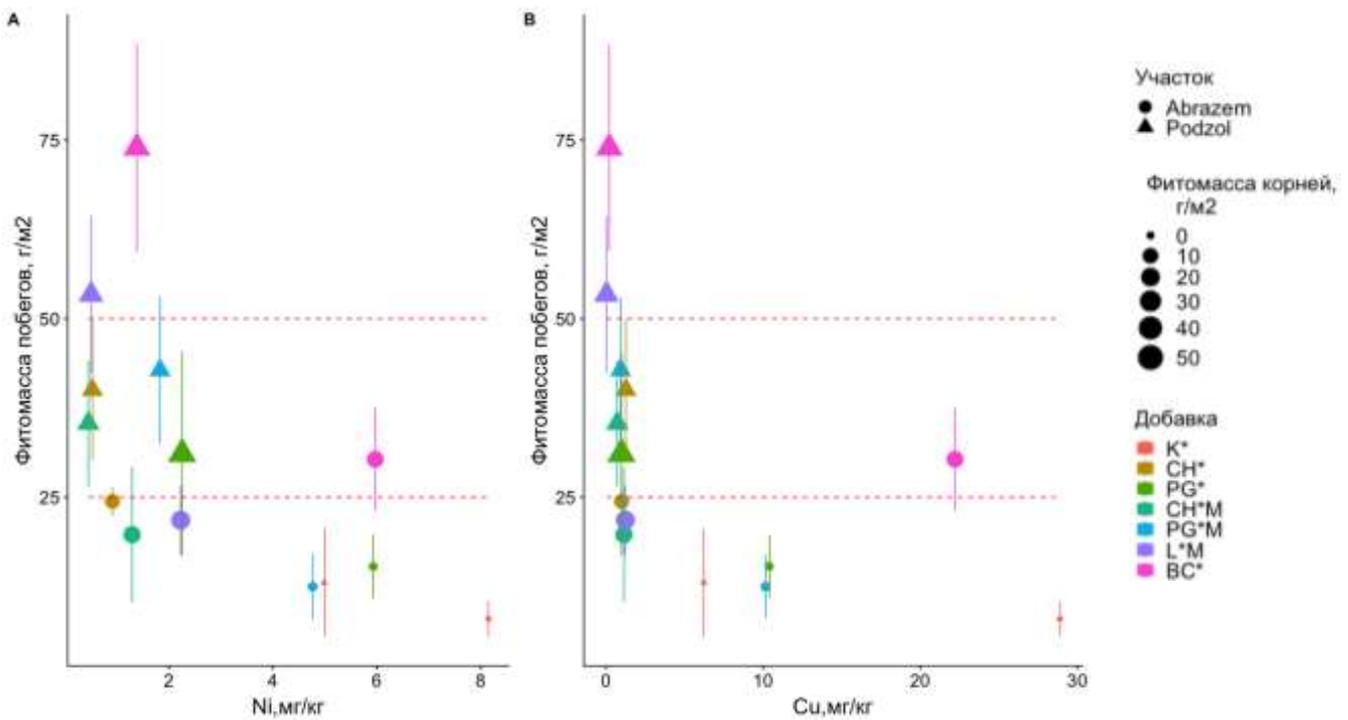


Рис. 1. Фитомасса тест-культуры относительно содержания в почвах водорастворимых форм Ni (слева) и Cu (справа)

Биологическая доступность ТМ

Говоря о биологической доступности ТМ, обратим внимание на содержание металлов в корнях и побегах растений (рис.2).

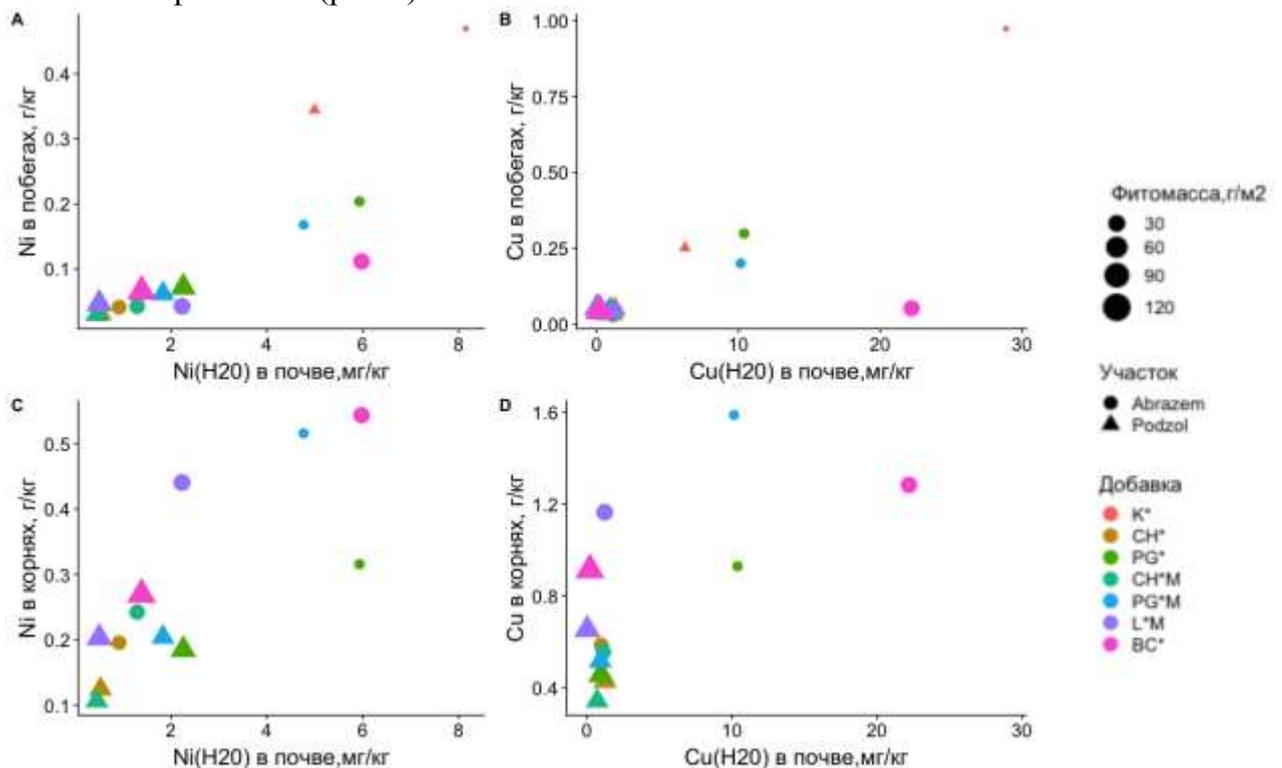


Рис.2. Валовое содержание Ni и Cu в корнях и побегах тест-культуры относительно содержания водорастворимых форм Ni и Cu в почвах



Накопление значительных количеств ТМ тест-культурой в вариантах без внесения органических добавок и мелиорантов может быть обусловлено повреждением корней прорастающих растений в кислых загрязненных почвах. Оценивая распределение ТМ между корнями и побегами тест-культуры, можно заключить, что гуматы, известь и биочар обладают лучшим протекторным действием по сравнению с торфогелем, особенно на почвах абразема.

Кинетика сушки почв

В почвенном покрове техногенных пустошей значительную долю занимают абраземы с выходящим на поверхность песчаным ВФ горизонтом, лишенным растительности, обеднённым органическим веществом и илистой фракцией. Совокупность почвенно-климатических факторов в сочетании с техногенным воздействием обуславливает развитие эрозионных процессов, определяемое, в частности, песчаным гранулометрическим составом и, следовательно, высокой фильтрационной и низкой водоудерживающей способностью почв.

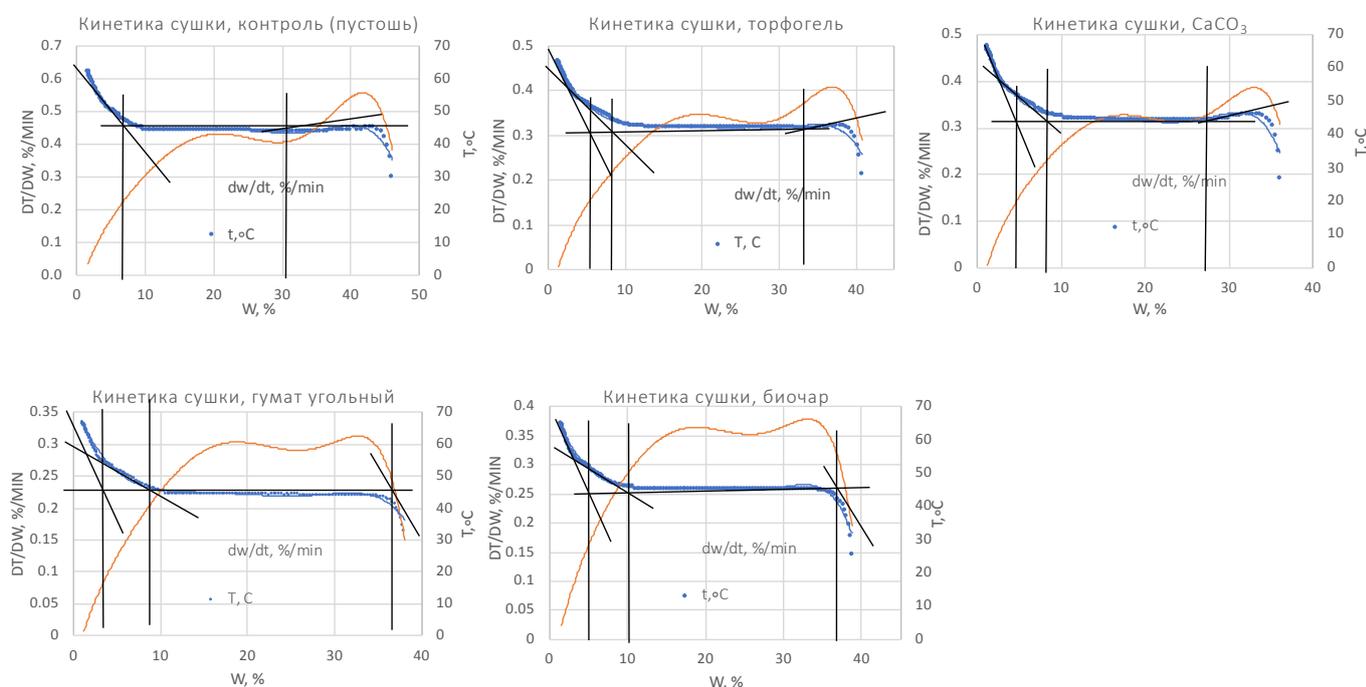


Рис.3. Кривые сушки почв эксперимента: зависимости скорости потери влаги образцом (dW/dt , мин) и изменения температуры (T°,C) образца от влажности образца (W , %)

Кривые сушки (КС) контроля, варианта с торфогелем и внесением извести в целом схожи, и четко выраженного диапазона постоянной скорости сушки в них выделить нельзя. Также схожи между собой КС почв вариантов с внесением гумата и биочара с уже проявляющимся диапазоном постоянной скорости сушки при постоянной температуре образца. По всей видимости, можно отметить, что внесение гумата и биочара в перспективе должно способствовать изменению водоудерживающей способности почв за счет сорбционных центров органического вещества.

Выводы

При умеренном загрязнении (ниже уровня содержания водорастворимых форм Ni и Cu 5-6 мг/кг почвы) эффективны все вносимые добавки. Торфогель и биочар теряют, а угольные гуматы сохраняют свою эффективность с ростом загрязнения. Потенциальным преимуществом органических добавок перед неорганическими мелиорантами является



улучшение физических свойств почв, что критически важно в условиях водной и ветровой эрозии и жесткого микроклимата. Это качество, в совокупности с возобновлением поступления свежего растительного материала, может способствовать более быстрому восстановлению экосистемных функций почв благодаря корректировке водно-воздушного режима и гумусного состояния.

Благодарность

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-04-01028.

Литература

27. Кашулина Г.М. Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты, КНЦ РАН, ч. 1, 2002. 158 с.,
28. Копцик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113-1130. DOI: [10.7868/S0032180X14070077](https://doi.org/10.7868/S0032180X14070077)
29. Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2016. № 11. С. 1375-1391. doi: 10.7868/S0032180X16090082
30. Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия. М.: Изд-во МГУ, 2013. 304 с.
31. Практикум по физике твердой фазы почв: учебное пособие / Е.В. Шеин, Е.Ю. Милановский, Д.Д. Хайдапова и др. — М., Буки-Веди Москва, 2017. 119 с.
32. Kozlov M.V., Barcan V. Environmental contamination in the central part of the Kola Peninsula: history, documentation, and perception. *Ambio*, 2000; 29(8). 512-517.
33. Tregubova P.N., Koptsik G.N., Stepanov A.A., Smirnova I.E., Kadulin M.S., Turbaevskaya V.V., Zakharenko A.I. Application of humic substances in the remediation of heavy-metal-polluted soils of the subarctic zone of the Kola Peninsula // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2017. Vol. 72, No. 5. P. 207-214. DOI: 10.3103/S0147687417050064



УДК 631

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКТОЗЕМОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОБУСТРОЙСТВА ЗЕЛЕННОЙ КРОВЛИ

Фаустова Е.В., Кoryтина М.А., Мороз Н.А.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

faustova_ek@mail.ru

«PARTICULAR QUALITIES OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF CONSTRUCTOZEMS
AND THEIR COMPONENTS INTENDED FOR ARRANGING A GREEN ROOF»

Faustova E.V., Korytina M.A., Moroz N.A

Moscow State University, Moscow, Russian Federation. rganisation

Annotation: Over the last few years, interest in greening the buildings, including roofs, has grown substantially, because "green roofs" are aesthetic and benefit the environment. The roof greening technology involves the use of substrates that, on the one hand, cause minimal impact on building, and, on the other, have optimal characteristics for plant growth. In this research agrophysical properties of two substrates with different content of components were reviewed in detail.

В последнее время существенно возрос интерес к озеленению крыш, поскольку «зеленые крыши» оказывают благотворное влияние на экологическую обстановку в месте их расположения (особенно в больших городах). «Зеленые крыши» уменьшают теплопотери зданий, удерживают осадки, снимая нагрузку с водостоков, продлевают срок службы крыш, спасая их от суровых воздействий температуры и климата. Кроме того «зеленые крыши» служат украшением больших городов, новыми рекреационными зонами для их жителей.

Технология озеленения крыш предполагает использование почвенных субстратов с одной стороны легких, оказывающих минимальную нагрузку на крыши и опоры здания с другой стороны с оптимальными условиями для произрастания растений. В связи с этим возникает необходимость в комплексном исследовании физических свойств субстратов, используемых в озеленении крыш для выявления наиболее оптимальных почвенных конструкций с учетом потребностей растений и климатических особенностей данного региона.

В работе исследованы различные агрофизические свойства почвенных субстратов и их компонентов такие как рН, плотность, порозность, функция влагопроводности, ОГХ (аппроксимация проводилась в программе RETC), функция температуропроводности и другие физические свойства общепринятыми методами. На основе экспериментально полученных физических свойств была сделана попытка рассчитать процессы движения влаги в почвенной толще с помощью программы Hydrus 1D.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие компоненты: песок, верховой торф, кокосовое волокно и агроперлит. Из которых были составлены две смеси (почвенные субстраты), различающиеся пропорциями слагающих их компонентов (% по объему): (1) 30% - речной песок, 30% - верховой торф, 30% - кокосовое волокно (койр), 10% - агроперлит; (2) 25% - речной песок, 15% - верховой торф, 10% - кокосовое волокно, 50% - агроперлит.

Данные субстраты были помещены в Модули GreenSkinbox, используемые для кровельного озеленения. Модуль имеет размеры 40x40x7 см.. Толщина почвенного субстрата



– 5 см. Сверху были высажены семена очитка едкого SEDUMACRE. Модули были установлены на крыше оранжерейного комплекса МГУ.

В целом субстраты характеризуются как невысокой плотностью почвы, так и плотностью твердой фазы, однако для первого субстрата эти значения выше.

Таблица 1. Физические и химические свойства субстратов.

| Объект | Плотность почвы, (г/см ³) | Плотность твердой фазы, (г/см ³) | Гигроскопическая влажность, (%) | Наименьшая влагоемкость, (%) | Коэффициент фильтрации, т (м/сут) | Сорг, мг | pH _в |
|------------|---------------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------|
| Субстрат 1 | 1.11 | 2.30 | 1.14 | 84.7 | 487.9 | 6.92 | 7.55 |
| Субстрат 2 | 0.87 | 2.48 | 0.88 | 88.5 | 1143.3 | 5.32 | 7.69 |

Коэффициент фильтрации для обоих субстратов исключительно высокий, (по Ф.Р.Зайдельману, 1985), но для второго субстрата он в два раза выше, чем для первого. Он также имеет большее значение ненасыщенной гидравлической проводимости, особенно в области низких значений давления влаги, что по-видимому, связано с высоким содержанием агроперлита. Выше рF 2,5 ненасыщенная гидравлическая проводимость для субстратов практически одинакова в исследуемом диапазоне давления до рF 2,7.

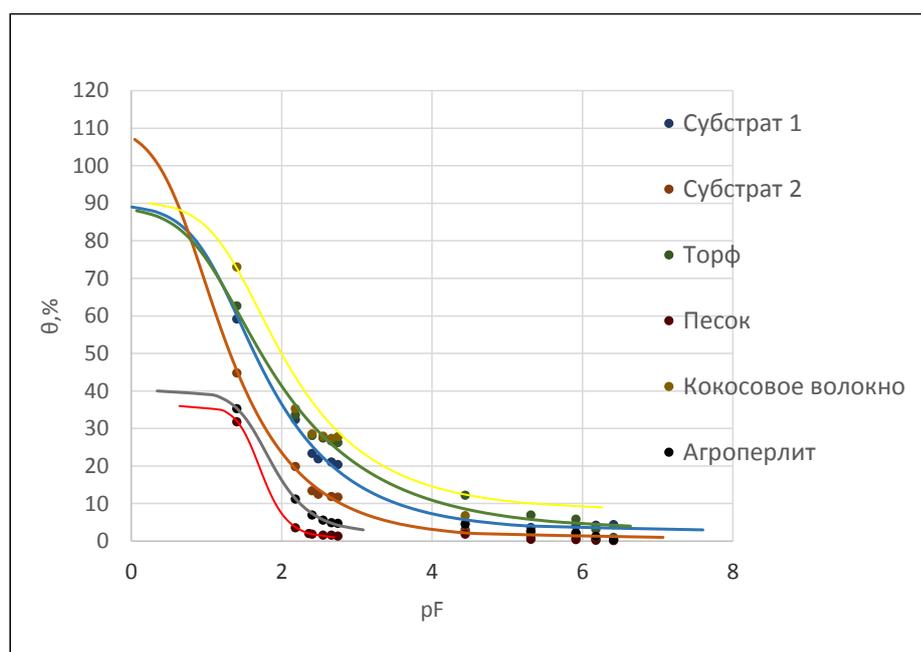


Рис.1 Основная гидрофизическая характеристика субстратов и их компонентов

Основная гидрофизическая характеристика, полученная для отдельных компонентов и субстратов показывает закономерное увеличение их водоудерживающей способности в ряду песок – агроперлит - субстрат 2- субстрат 1 – торф – кокосовое волокно.

Температуропроводность первого субстрата (с повышенным содержанием торфа) значительно ниже, чем у второго, так в диапазоне влажности от 60 до 20 % средние значения в первом случае составляют около 6, во втором 8 см²/час. То, что первый субстрат имеет более низкую способность проводить температурную волну, препятствует его сильному промерзанию в зимнее время.



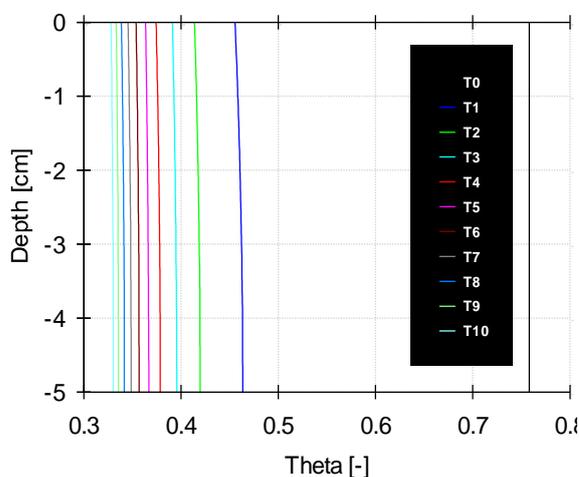
Для субстратов была проведена аппроксимация ОГХ уравнением ван Генухтена, параметры которой использовались для моделирования элементов водного режима (таблица 2).

Таблица 2. Параметры аппроксимации уравнением Ван-Генухтена.

| Объект | Qr (см ³ /см ³) | Qs (см ³ /см ³) | α (см ⁻¹) | n (-) |
|------------|---|---|---------------------------------|----------|
| Субстрат 1 | 0.029 | 0.897 | 0.832 | 1.44 |
| Субстрат 2 | 0.009 | 1.11 | 2.29 | 1.51 |

Одной из главных задач при функционировании субстратов является обеспечение оптимальных водно-воздушных условий для растений. Для этой оценки в программе Hydrus 1D были просчитаны элементы водного режима. За начальные условия во всем профиле была взята влажность соответствующая капиллярно-сорбционному давлению -10 см водного столба. На нижней границе был задан свободный сток, на верхней границе три варианта испарения, осадки моделировались. Расчетный срок составил 10 дней. В первом варианте с нулевым испарением перераспределение влаги по профилю соответствует условиям полевого определения влажности НВ. Второй вариант испарения 2 мм/сут приводил к достижению в нижних горизонтах влажности, соответствующей ВРК. В третьем варианте испарение в течение 10-дневного срока экспоненциально менялось от 3 мм/сут в первый день до 0.01мм в последний день.

Profile Information: Water Content



Profile Information: Water Content

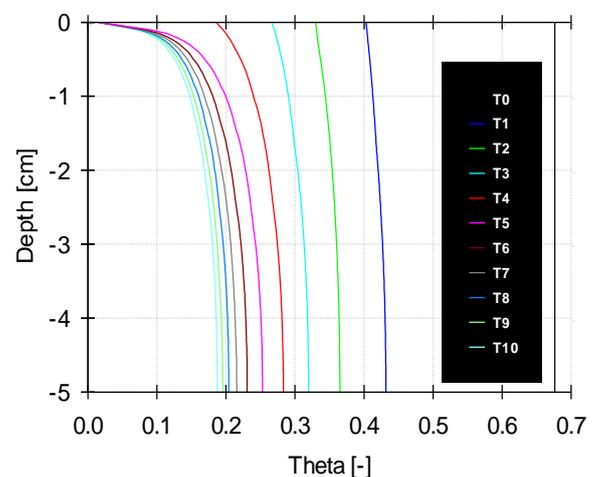


Рис.2. Эпюры распределения влажности для субстрат 1 и субстрат 2 (второй вариант – постоянное испарение 2 мм/сут)

Результаты моделирования показали, что наименьшей влагоемкости субстраты достигают примерно на 3 день, однако для первого субстрата влажность соответствующая НВ больше. При постоянном уровне испарения влажность верхнего слоя второго субстрата на пятый день снизилась до 5 % из-за прекращения подтока влаги из нижнего горизонта. В первом субстрате ни в один из расчетных дней такого резкого изменения влажность с глубиной не наблюдается.



Проведенные исследования показали, что почвенные субстраты содержат компоненты, обеспечивающие хорошую водопроницаемость (песок), аэрируемость (агроперлит), водоудерживающие свойства (кокосовое волокно и верховой торф). Они обладают довольно высоким содержанием гумуса, имеют нейтральную реакцию среды. Однако, первый субстрат отличается лучшими агрофизическими свойствами из-за высокой водоудерживающей способности, меньшей температуро- и влагопроводности. В связи с этим именно такой состав субстрата можно рекомендовать для озеленения крыш в условиях умеренного климата.



СЕКЦИЯ 7. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ И ВОПРОСЫ КРИОГЕНЕЗА



UDC 631.48

FIELD ELECTROPHYSICS IN INVESTIGATION OF PERMAFROST AFFECTED SOILS

Evgeny Abakumov

¹Faculty of Biology, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation
E_abakumov@mail.ru, e.abakumov@spbu.ru

Annotation: Cryosols of the Arctic and Antarctic region has been investigated with the use of field electrophysics with aim to evaluate the active layer thickness and permafrost table depth. Main types of profile changing of the apparent electric resistivity in soil are established.

Introduction

Permafrost affected soil play an important role in stabilization of huge amount of organic carbon and nutrients in cryolithozone. Active layer thickness and the depth of the permafrost layer are the basic features of soil cover of the Polar region and can be assessed by different direct or indirect methods. The classic method is to dig the soil profile or to drill the soil-ground mass with the aim of fixing the border of the active layer and permafrost morphologically. It is also possible to push a sharpened steel bar into the soil or ground until the frozen ground is encountered. While the still bare penetration and drilling became not very effective in investigation the soil-antropic-layer strata's, the electric resistivity measurements became more informative tool for investigation of soil-permafrost complex organization and its layer stratification. That is why the use of Vertical Electric Sounding (VERS) became actual for Antarctic environments, where the CALM plots cannot be established on the places with the weak soil layer, underlayed by massive crystalline rock.

Nowadays, direct-current resistivity (DC resistivity) methods have to be used for the identification of permafrost depth and soil profile heterogeneity. Geophysical methods have many advantages (Scot et al. 1990) and have been widely used for permafrost identification and evaluation of soil permafrost layer vertical stratification (Hauk et al. 2003). This is a quantitative method, which allows carrying out quick measurements of ER along the different soil profiles, stratas and the permafrost layer. The key advantage of these methods is that the equipment is portable, easy to handle and can be used in severe climatic expedition conditions. The second one is the ability to detect the permafrost depth or to specify soil stratification without drilling or soil-pit preparation. A one-dimensional model can be assumed for mapping of the permafrost depth in relatively homogenous conditions, whereas the two-dimensional approach was proposed for plots with a high degree of inhomogeneity (Hauk 2003, Pozdnyakov, 2008). It is well known that electric conductivity and resistivity depend on soil chemical and physical properties, especially salt content, texture class of the fine earth, coarse fraction content and soil moisture values (Pozdnyakov, 2008, Magnin et al. 2015). It was substantiated previously (Pozdnyakov, 2008) that vertical electrical resistivity sounding (VERS) method is useful for identification of the separate soil horizons and stratas. The method of VERS allows us to identify contrast between soil horizons and layers changes in vertical scale and provides the precise information about solum-parent material organization. On the basis of the published data (Pozdnyakov et al. 2008, Hauk et al. 2003, Gibas et al. 2005, Smernikov, et al. 2008, Vanhala et al. 2009, Turu I Michels & Ros Visus 2013) we suppose that there are essential changes in values of electrical resistivity on the



transition from the solum to the permafrost (Abakumov, Tomashunas, 2016, Alekseev et al, 2016). Moreover, it has been previously shown, that values of real electric resistivity (ER) are different for clays, sands, over-moisted layers and permafrost. ER can be only about 10-30 Ω m in clay textured substrata's, about 500 Ω m in dry sand or even up to 40000-80000 Ω m in permafrost layers. Measurements of ER and visualization are well known methods for permafrost mapping and identification of soil-lithological heterogeneity in vertical scale (Pozdnyakov, 2008, Marchenko, 2007).

- To measure ER in various soils of the Arctic and Antarctic environments,
- To identify the depth of permafrost and active layer thickness, and

Objects and methods

The ER values of the soil profiles, separate horizons and upper permafrost layers can be estimated from the vertical electrical sounding data, which provides the values on the changes in the electrical resistivity throughout the profile from the soil surface without digging pits or drilling. This method allows dividing the soil layer vertically into genetic layers with different properties and characteristics and to evaluate the current active layer depth (Pozdnyakov et al., 1996, Pozdnyakov, 2008). Normally, different soil layers have different ER values, that is why, the sharp changes in ER values in soil profiles can be interpreted as results of transition of one horizon to another (Pozdnyakov, 2008).

In our study, the resistivity measurements were performed using four-electrode (AB + MN) arrays of the AMNB configuration with use of the Schlumberger geometry (Marchenko, 2007). A Landmapper ERM-03 instrument (Landviser, USA) was used for the VERS measurements in this study. Vertical electric soundings using the Schlumberger configuration were carried out at nine locations on different part of the "Bellinshausen" station surroundings. The apparent resistivity readings at every VERS point were automatically displayed on the digital readout screen and then written down on the field note book with taking into account the geometry factor.

A VERS was used to study the upper 0- to 3-m thick layer in greater detail. The distance between the A and B electrodes ranged from 10 to 600 cm while the distance between the M and N electrodes was constant – 10 cm. Electrodes were placed on the soil (ground) surface with depth of penetration into soil about 0.5 cm. The distance between MN electrodes were constant, while the distance between A and B electrodes were changes from 10 to 600 cm. The soils were "sounded" thoroughly and found to vary between 5 cm and 3 m in A-B distances. A 1D layer model (ZonDIP program) of apparent and real resistivity's processing and visualization were used. This model provides the data on apparent resistivity values changes with the depth (ρ), the layers thickness (h) and layer depth (z).

Totally 14 soil profiles from the different parts of the surroundings of the Bellinshausen station have been investigated. Field data presented by three replications of measurements at each point. The geometric factor, K, was first calculated for all the electrode spacing's using the formula: $K = \pi \times (AB/2+MN/2) \times (AB/2-MN/2) / (2 \times MN/2)$ for Schlumberger array. The values obtained, were then multiplied with the resistance values to obtain the apparent resistivity, ρ_a , values. Then the apparent resistivity, ρ_a , values were plotted against the electrode spacing's ($1/2AB$) on a log-log scale to obtain the VERS sounding curves using an appropriate computer software ZONDIP.



Results and discussion

The modeling of the VERS measurements carried out at 40 stations in Yamal region and at 10 station in Antarctic region has been used to derive the geo-electric sections for the various profiles. These have revealed that there are mostly two or three geologic layers beneath each VERS station. Three resistivity sounding curve types were obtained from the studied area and these are the 1 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), 2 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) and 3 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) type curves. Measured apparent resistivity values (black dots) are plotted against half electrode distance and fitted by manual curve resulting from inversion process. Solid black line denotes the layer model and the thin lines show the calculated model apparent resistivity curve. The purpose of the program ZONDIP is to determine the resistivity of the rectangular blocks that will produce an apparent resistivity pseudo-section that agrees with the actual measurements. The depths of the layers can also be changed manually by the user. The optimization method basically tries to reduce the difference between the calculated and measured apparent resistivity values by adjusting the resistivity of the model blocks. However it must be stated that small-scale lateral inhomogeneities will prevent very good agreement between model and observed data.

Results of soil VERS measurement showed essentially heterogeneity of ER values within the soil profile in investigated plots. The lowest values of ER were revealed for the upper solum of the soils investigated. There are notable sharp changes in ER values with soil depth, particularly in those layers, where the solum (active soil layer) is in contact with the permafrost table. This well corresponds to data, obtained previously (Ohashi et al, 2012, Abakumov & Tomashunas, 2016), that the permafrost layers shows the ER values about hundreds - thousands Omm, while the soil materials in borders of active layer characterizes by values about 10-100 Omm. The data obtained show that the upper border of the permafrost layer coincides with that ER transition, which was identified in field on the base of soil profile morphology description.

. VERS methodology can be used also for monitoring of the station current activity impact on the grounds. Degradation of permafrost can affect the stability of buildings basement and construction stability (Chamber et al, 2006). Our data on ER values in permafrost-affected soil coincides with those, published by McGinins and Jensen (1971) and Kasprzak (2015) who have show that increased values of ER related to the permafrost table. At the same time, ER values in antropogenically-affected soils are lesser that in natural ones. Antropogenically-affected soils show the lower ER values throughout the vertical profile which is connected with changing of composition and stratification of the solum. This is normal for Technosols in of Boreal environments, without effect of permafrost (Pozdnyakov, 2008). The higher ER values in soils of natural environments caused by natural fabric of the particles and aggregates as well as higher portion of the fine earth of clayely texture, which normally provides the higher measured ER values (Pozdnyakov, 2008). Thus, the ER values can be used in field survey of polar soils with aim of identification of antropic mechanical impact.

Conclusions

The use of VERS methodology is very perspective for preliminary assessment of soil active layer depth and vertical soil heterogeneity without digging of soil pit and without using of steel bar. The equipment for VERS measurements is easy to handle and allow to evaluate vertical soil heterogeneity in numerous field plots with aim of preliminary field soil survey.

Acknowledgment

The work was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (projects no. [18-04-00900](#))



This paper is dedicated to the memory of Professor, Dr. Anatoly Pozdnyakov, Dept. of Soil Physics of Moscow University, who passed away August 15 2015. This work benefited greatly from his contribution.

References

- Abakumov, E.; Tomashunas, V. (2016) Electric resistivity of soils and upper permafrost layer of the Gydan Peninsula. *Polarforschung*, 86, 1, 27-34
- Alekseev I., Abakumov I, Shamilishvily, G. (2016) Vertical electric sounding of soil and permafrost layers of the Eastern macro slope of the Polar Urals and the surroundings of Erkuta river. *Agrophysics*. 3. 1-6.
- Chambers J.E., Kuras O., Meldrum P.I. et al. (2006) Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71 (6), 231-B239. *Geophys.*, ed. S.Ward (ed.) Soc. Explor. Geophys, Tulsa, 355-384.
- Gibas, J., Rachlewicz, G. & Szczucinski W. (2005) Application of DC resistivity soundings and geomorphological surveys in studies of modern Arctic glacier marginal zones, Petuniabukta, Spitsbergen. *Polish Polar Research*. 26(4): 239-258.
- Hauck, C., Mühl, D.V. & Maurer, H. (2003) Using DC resistivity tomography to detect and characterize mountain permafrost. *Geophys. Prospecting*. 51, 273-284
- Kasprzak, M. (2015) High-resolution electrical resistivity tomography applied to patterned ground, Wedel Jarlsberg Land, south-west Spitsbergen. *Polar research* 34, 25678.
- Magnin, E., Deline P., Ravanel L., et al. (2015) Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l) *The Cryosphere*, 9, 109–121
- Marchenko M.N. (ed). (2007) Manual on Vertical Electric Sounding.- Moscow, Moscow State University. 1-30.
- McGinis, L.D., Jensen, T.E. (1971) Permafrost-hydrogeologic regimen in two ice-free valleys, antarctica, from electrical depth sounding. *Quaternary research*, 1, 389-409.
- Ohashi, K., Koike, T, Takenaka, S. et al. (2012) Study on Applicability of Electric Sounding for Interpretation of the Internal Structure of Glacial Moraines. *Global Environmental Research*. 16. 51-58.
- Pozdnyakov, A.I. (2008) Electrical parameters of soils and pedogenesis. *Eurasian Soil Science* 10, 1050-1058.
- Pozdnyakov, A.I., Pozdnyakova, L.A. & Pozdnyakova D.A. (1996) Constant Electric Fields in Soils. 1-360.
- Scott, W., Sellmann, P. & Hunter, J. (1990) Geophysics in the study of permafrost.- Geotechnic. Environment.
- Smernikov, S.A., Pozdnyakov, A.I. & Shein E.V. (2008) Assessment of soil flooding in cities by electrophysical methods. *Eurasian Soil Science*, 10, 1059-1065.
- Vanhala, H., Lintinen, P. & Ojala A. (2009) Electrical Resistivity Study of Permafrost on Ridnitšohkka Fell in Northwest Lapland, Finland. *Geophysica*, 45, 103-118.
- Turu I Michels V., Ros Visus X. (1990) Geophysical survey carried out in the Hansbreen glacial front (Hornsund, SW Spitzbergen): Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR), Magnetic susceptibility of rocks and Electrical Resistivity facies: Permafrost identification and subglacial aquifers.- IV Congreso Ibérico de la I.P.A. Núria (Vall de Ribes, Pirineo oriental), junio 2013.



УДК 631.436

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУППИРОВКИ ПО ТЕКСТУРНЫМ КЛАССАМ

Архангельская Т.А.

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация

arhangelskaia@gmail.com

MODELING SOIL THERMAL DIFFUSIVITY BASING ON TEXTURAL GROUPING

Arkhangelskaya T.A.

Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University

Annotation: This study presents the parameters of the thermal diffusivity vs. water content curves for eight textural classes. Data for 77 sandy, loamy, and clayey soils of the European part of Russia were analyzed. The Willmott index of agreement between the model-predicted curves and observed values was 0.699.

Введение

В статье представлены алгоритмы расчета температуропроводности почвы при различной влажности, основанные на экспериментальных данных для 77 образцов почв различного гранулометрического состава от рыхлых песков до средних глин. Эти алгоритмы представляют собой модель первого иерархического уровня, поскольку в качестве входных данных используются лишь названия текстурных классов. Выходными данными модели являются табулированные параметры зависимости температуропроводности от влажности, различные для разных текстурных классов.

Объекты и методы

Использовали экспериментальные зависимости температуропроводности от влажности, полученные для песчаных, суглинистых и глинистых почв Европейской части России. Объекты исследования включали дерново-подзолистые слабодифференцированные супесчаные и песчаные пахотные почвы (УОПЭЦ «Чашниково», Московская обл., 56°2'N, 37°10'E), дерново-слабоподзолистые песчаные почвы (Приокско-Террасный Биосферный Заповедник, Московская обл., 54°55'N, 37°34'E), суглинистые серые лесные почвы и почвы со вторым гумусовым горизонтом (Владимирское ополье, 56°23'N, 40°25'E), светло-серую лесную окультуренную среднесуглинистую почву («Заокские питомники», Тульская область, 54°36'N, 37°26'E), чернозем обыкновенный среднесуглинистый («Каменная степь», Воронежская область, 51°03'N, 40°43'E), луговато-черноземную выщелоченную среднесуглинистую пахотную почву (хутор Игнатьевский, Республика Адыгея, 44°50'N, 40°30'E).

Образцы ненарушенного сложения отбирали, врезая в почву тонкостенный металлический цилиндр. Высота и диаметр образцов из Каменной Степи были равны 7 и 5 см; остальных образцов – 10 и 3.8 см.

Температуропроводность образцов определяли в лаборатории, применяя метод регулярного режима. Для каждого образца была проведена серия измерений и получена зависимость температуропроводности от влажности в диапазоне от капиллярного насыщения до воздушно-сухого состояния.

Статистический анализ данных проводили для 77 образцов, используя 836



экспериментальных значений температуропроводности почв при различной влажности. Плотность образцов из использованной выборки менялась от 0.86 до 1.82 г/см³, содержание углерода – от 0.1 до 6.5%, содержание физической глины – от 1 до 76%, температуропроводность – от 0.77×10^{-7} м²/с до 10.09×10^{-7} м²/с.

При построении моделей применяли метод группировки (Pachepsky, Rawls, 1999). Группировку почв проводили по текстурным классам аналогично тому принципу, который используется в компьютерной программе ROSETTA (Schaap et al., 2001). Разбиение имеющихся данных по текстурным классам проводили, используя классификацию Долгова (1966). Было выделено 6 рыхлых песков, 8 связных песков, 4 супеси, 2 легких суглинка, 11 средних суглинков, 27 тяжелых суглинков, 6 легких глин и 13 средних глин.

Для каждого из выделенных текстурных классов рассчитывали параметры средней зависимости температуропроводности от влажности, используя все экспериментальные точки, относящиеся к этому классу, и аппроксимируя их предложенной ранее четырехпараметрической функцией (Arkhangel'skaya, 2009):

$$\kappa = \kappa_0 + a \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где κ_0 – минимальная температуропроводность почвы; $\kappa_0 + a$ – максимальная температуропроводность, θ_0 и b – параметры формы кривой.

Помимо параметров κ_0 , a , θ_0 , b для каждого из выделенных текстурных классов, дополнительно были получены параметры генеральной средней кривой $\kappa(\theta)$, построенной по всем имеющимся данным.

Точность аппроксимации экспериментальных точек расчетными кривыми оценивали с помощью безразмерного индекса согласия Уиллмотта d_r (Willmott et al., 2012):

$$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} & \text{при } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1 & \text{при } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases}, \quad (2)$$

где P_i – расчетные оценки, O_i – попарно соответствующие им экспериментальные значения, n – количество пар $P_i - O_i$, \bar{O} – экспериментальное среднее. Когда расчетные оценки приближаются к экспериментальным значениям, d_r приближается к 1.

Индекс Уиллмотта рассчитывали для каждого из текстурных классов, а также для всей выборки в целом. Для каждого из выделенных текстурных классов методом наименьших



квадратов определяли параметры k_0 , a , θ_0 , b и рассчитывали температуропроводность почвы при всех тех значениях влажности, для которых имелись экспериментальные значения температуропроводности. Затем для каждого текстурного класса рассчитывали индекс Уиллмотта, используя пары $P_i - O_i$ из этого класса. Индекс Уиллмотта для всей выборки рассчитывали, используя все полученные в результате вышеописанного алгоритма пары $P_i - O_i$ из всех текстурных классов.

Индекс Уиллмотта для генеральной средней кривой, построенной по всем имеющимся данным, определяли, используя параметры этой кривой. Экспериментальные данные сравнивали с результатами расчетов температуропроводности с использованием одних и тех же параметров функции (1) для всех образцов.

Результаты и обсуждение

Практически в каждом из выделенных текстурных классов наблюдался значительный разброс экспериментальных значений температуропроводности, предположительно связанный в первую очередь с вариабельностью плотности почв и содержания в них органического углерода, а в некоторых случаях – с наличием аморфного железа. Вместе с тем разделение массива данных по текстурным классам позволило выявить тренд: температуропроводность почв закономерно уменьшалась от рыхлых песков $(1.94-10.09) \times 10^{-7}$ м²/с к средним глинам $(0.77-3.33) \times 10^{-7}$ м²/с. При этом менялся не только диапазон изменчивости температуропроводности с влажностью, но и форма средних кривых.

Таблица 1. Параметры средних зависимостей температуропроводности от влажности k_0 , a , θ_0 , b и значения индекса согласия Уиллмотта d_T для выделенных текстурных классов

| Название почв по гранулометрическому составу | Количество образцов | k_0 , м ² /с | a , м ² /с | θ_0 , м ³ /м ³ | b | d_T |
|--|---------------------|---------------------------|-------------------------|---|-------|-------|
| Пески рыхлые | 6 | 2.364×10^{-7} | 5.697×10^{-7} | 0.249 | 1.419 | 0.706 |
| Пески связные | 8 | 2.986×10^{-7} | 3.941×10^{-7} | 0.187 | 0.833 | 0.673 |
| Супеси | 4 | 2.221×10^{-7} | 2.550×10^{-7} | 1.135 | 2.891 | 0.532 |
| Суглинки легкие | 2 | 2.767×10^{-7} | 2.710×10^{-7} | 0.277 | 0.351 | 0.575 |
| Суглинки средние | 11 | 2.171×10^{-7} | 1.870×10^{-7} | 0.365 | 0.562 | 0.687 |
| Суглинки тяжелые | 27 | 2.250×10^{-7} | 2.003×10^{-7} | 0.367 | 0.462 | 0.669 |
| Глины легкие | 6 | 1.303×10^{-7} | 2.429×10^{-7} | 0.393 | 0.316 | 0.766 |
| Глины средние | 13 | 0.998×10^{-7} | 1.735×10^{-7} | 0.358 | 0.326 | 0.845 |

Параметры средних кривых для текстурных классов и индексы согласия, отражающие разброс экспериментальных точек относительно этих кривых, приведены в табл. 1. Видно, что параметр k_0 , соответствующий минимальному значению температуропроводности, в целом уменьшается с утяжелением почвы, причем наиболее резкое снижение этого параметра происходит при переходе от тяжелых суглинков к легким глинам. Параметр a , описывающий разницу между максимальной и минимальной температуропроводностью почвы, тоже уменьшается с утяжелением почвы, но в данном случае основное снижение происходит при переходе от рыхлых песков к пескам связным и затем к супесям.

Безразмерные индексы согласия для песков (0.71 для рыхлых и 0.67 для связных) оказались сходными с индексами для средних и тяжелых суглинков (0.69 и 0.67). Наименьшие индексы согласия получены для супесей и легких суглинков (0.53 и 0.58) и наибольшие – для легких и средних глин (0.77 и 0.85).



Точность генеральной средней кривой $k(\theta)$, параметры которой были рассчитаны по всем имеющимся данным для 77 образцов, была невелика. Индекс согласия между этой кривой и экспериментальными данными составил лишь 0.55. Использование группировки по гранулометрическому составу с построением средних кривых для каждого из выделенных текстурных классов существенно улучшило точность расчетных оценок. Общий для всей выборки индекс согласия между экспериментальными данными и набором средних кривых увеличился до 0.70.

Заключение

Получены параметры зависимости температуропроводности почвы от влажности для восьми текстурных классов, включающих песок рыхлый, песок связный, супесь, суглинок легкий, суглинок средний, суглинок тяжелый, глину легкую, глину среднюю. При использовании предложенной параметризации для расчетной оценки температуропроводности почвы требуется знать лишь название почвы по гранулометрическому составу и ее влажность.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

- Долгов С.И., ред. (1966) Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука. 259.
- Arkhangel'skaya T.A. (2009) Parameterization and Mathematical Modeling of the Dependence of Soil Thermal Diffusivity on the Water Content // *Eurasian Soil Science*. **42**(2), 162–172.
- Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. (1999) Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal* **63**, 1748–1757.
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. (2001) ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* **251**, 163–176.
- Willmott C.J., Robeson S.M., Matsuura K. (2012) A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* **32**, 2088–2094.



УДК 631.436

ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ТОРФОПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ

Т.А. Архангельская, А.А. Гвоздкова

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
arhangelskaia@gmail.com

THERMAL DIFFUSIVITY OF PEAT-SAND MIXTURES

T.A. Arkhangelskaya, A.A. Gvozdkova
Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University

Annotation: This study presents the thermal diffusivity vs. water content curves for peat-sand mixtures measured using the unsteady-state method. Volumetric sand content was from 0% (pure peat) to 62% (pure sand). Peak values of thermal diffusivity were from $1.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for pure peat to $14.28 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for pure sand.

Введение

Внесение песка в пахотный горизонт торфяных почв с целью улучшения их водно-воздушного и теплового режима – известный агромелиоративный прием (Зайдельман и др., 1995). Кроме того, торфопесчаные смеси широко используются в городском озеленении, в частности при создании почвенных конструкций (Машинский и др., 2001). Добавление песка в торф увеличивает теплопроводность получившейся смеси по сравнению с торфяным материалом, благодаря чему температурная волна лучше проникает в глубину почвенного профиля. Это позволяет избежать перегрева верхних слоев почвы или почвенной конструкции и замедлить минерализацию органического вещества. Поскольку тепловые свойства почв сильно зависят от влажности, экспериментальные исследования этих свойств для торфопесчаных смесей обычно проводят в широком диапазоне значений содержания почвенной влаги (Zhao, Si, 2019).

Объекты и методы

Объектом исследования были органоминеральные смеси, состоящие из материала пахотного горизонта торфяной окультуренной почвы на древесных торфах, подстилаемых залежью травяного (преимущественно осокового) торфа (Ковалев и др., 1998), и кварцевого отмытого песка, просеянного через сито 1 мм. Торф при полевой влажности и воздушно-сухой песок тщательно перемешивали, и затем набивали с одинаковым усилием в металлические цилиндры радиусом 4 см и высотой 10 см. Долю песка в смеси характеризовали его объемным содержанием в образце, как предложено в работе (Brovka, Rovdan, 1999). Были подготовлены образцы с объемными долями песка 0% (гор. Апах торфяной окультуренной почвы без песка), 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 55, 62% (чистый песок), каждый в двух повторностях (рис. 1). Для торфяной окультуренной почвы было измерено содержание органического углерода методом сухого сжигания в токе кислорода (Когут и др., 1993). На основе этих данных рассчитывали содержание органического углерода в полученных смесях. После набивки образцы капиллярно насыщали, измеряли теплопроводность при капиллярной влажности, и затем постепенно подсушивали. Теплопроводность полученных образцов определяли в диапазоне от капиллярной влажности до воздушно-сухого состояния, используя метод регулярного режима. Последовательность действий подробно описана в статье (Arkhangelskaya, 2004). После



окончания измерений температуропроводности определяли влажность материала в воздушно-сухих образцах и рассчитывали плотность образцов.

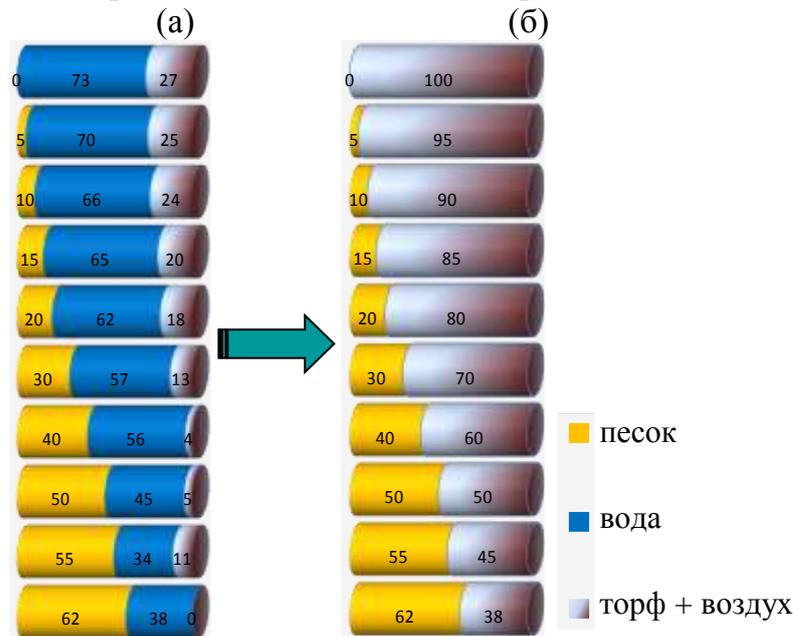


Рис. 1. Объемное содержание кварцевого песка, воды и торфа с воздухом в исследованных образцах при капиллярном насыщении (а) и в воздушно-сухом состоянии (б).

Результаты и обсуждение

Содержание органического углерода в торфяном материале составляло 30.5%, меняясь в исследованных смесях от 23.5% при содержании песка 5% до 1.1% при содержании песка 55% (табл. 1). Плотность набивных образцов менялась от 0.44 г/см³ для торфа до 1.71 г/см³ для чистого кварцевого песка. Капиллярная влажность исследованных образцов варьировала от 0.73 см³/см³ для материала из гор. Апах торфяной окультуренной почвы до 0.38 см³/см³ для песка.

Таблица 1. Свойства исследованных образцов: объемная доля песка в системе V_p , содержание органического углерода C , плотность набивки ρ_b , минимальное и максимальное значение температуропроводность K_{min} и K_{max}

| $V_p, \%$ | $C, \%$ | $\rho_b, \text{г/см}^3$ | | $K_{min}, \text{М}^2/\text{с}$ | | $K_{max}, \text{М}^2/\text{с}$ | |
|-----------|---------|-------------------------|---------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------|
| | | Серия 1 | Серия 2 | Серия 1 | Серия 2 | Серия 1 | Серия 2 |
| 0 | 30.5 | 0.44 | 0.44 | 0.61×10^{-7} | 0.78×10^{-7} | 1.46×10^{-7} | 1.62×10^{-7} |
| 5 | 23.5 | 0.59 | 0.53 | 0.65×10^{-7} | 0.70×10^{-7} | 1.81×10^{-7} | 1.95×10^{-7} |
| 10 | 18.5 | 0.67 | 0.65 | 0.78×10^{-7} | 0.65×10^{-7} | 2.03×10^{-7} | 2.34×10^{-7} |
| 15 | 14.7 | 0.78 | 0.74 | 1.08×10^{-7} | 0.87×10^{-7} | 2.83×10^{-7} | 2.78×10^{-7} |
| 20 | 11.8 | 0.86 | 0.78 | 1.25×10^{-7} | 1.46×10^{-7} | 4.29×10^{-7} | 3.03×10^{-7} |
| 30 | 6.9 | 1.01 | 1.01 | 2.08×10^{-7} | 1.73×10^{-7} | 4.29×10^{-7} | 4.96×10^{-7} |
| 40 | 4.0 | 1.30 | 1.22 | 2.34×10^{-7} | 1.88×10^{-7} | 5.84×10^{-7} | 6.33×10^{-7} |
| 50 | 2.0 | 1.43 | 1.32 | 3.41×10^{-7} | 2.37×10^{-7} | 7.40×10^{-7} | 8.12×10^{-7} |
| 55 | 1.1 | 1.44 | 1.41 | 2.92×10^{-7} | 2.47×10^{-7} | 8.77×10^{-7} | 10.39×10^{-7} |
| 62 | 0.0 | 1.67 | 1.71 | 7.01×10^{-7} | 4.29×10^{-7} | 13.63×10^{-7} | 14.28×10^{-7} |

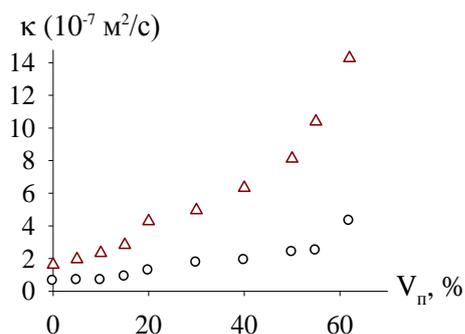


Рис. 2. Зависимость минимальных (кружки) и максимальных (треугольники) значений температуропроводности набивных образцов (k) от объемного содержания кварцевого материала (V_n).

Столь значительные расхождения в плотности, содержании органического углерода и капиллярной влажности привели к существенной разнице в температуропроводности исследованных материалов. По мере увеличения объемной доли песка в образце возрастала как минимальная температуропроводность почвы, так и разница между максимальной и минимальной температуропроводностью (рис. 2).

Рост температуропроводности с увеличением доли песка имел нелинейный характер: пока объем песка в образце не превышал 10%, его температуропроводность в воздушно-сухом состоянии не отличалась от температуропроводности торфа, несмотря на увеличение плотности, а максимальная температуропроводность, наблюдаемая при оптимальной для прогревания почвы влажности, росла незначительно. Добавление 15-20% песка уже привело к существенному росту температуропроводности. Это значит, что небольшие добавки песка, при которых отдельные зерна кварца распределены в торфяном материале, не вносят большого вклада в температуропроводность торфопесчаной смеси: некоторое увеличение теплопроводности полностью или почти полностью компенсируется ростом объемной теплоемкости за счет увеличения плотности образца. Между 10 и 15% содержания песка наблюдается что-то вроде порога, после которого в торфяной толще начинают формироваться непрерывные песчаные цепочки, которые могут служить путями быстрого переноса тепла. Добавление 20-30-40% песка приводит к росту сети таких цепочек, и, по видимому, начиная с 50% объемного содержания песка мы уже имеем дело скорее с песчаным материалом, температуропроводность которого быстро растет по мере уменьшения торфяных теплоизолирующих прослоек между минеральными зернами.

Сходный эффект малого влияния небольших добавок песка в торфяной материал на свойства смеси, а именно на кривую водоудерживания и доступность кислорода корням растений, отмечается в работах (Walczak et al., 2002; Witkowska-Walczak et al., 2002). Оба эти показателя не меняются вплоть до 60% весового содержания песка в смеси.

Зависимости температуропроводности от влажности имели качественно разный характер (рис. 3). В целом в смесях с объемным содержанием песка 40% и ниже рост температуропроводности с влажностью наблюдался во всем исследованном диапазоне. При этом по мере увеличения содержания песка в смеси характер изменения температуропроводности с влажностью приобретал все более S-образный характер. При содержании песка 50% и более полученные зависимости имели выраженный максимум в области значений влажности 0.10–0.25 см³/см³. При более высоких значениях влажности температуропроводность смесей снижалась, так что ее величина при капиллярном увлажнении была существенно ниже температуропроводности в максимуме. Координата максимума при увеличении содержания песка закономерно смещалась в сторону низких



значений влажности.

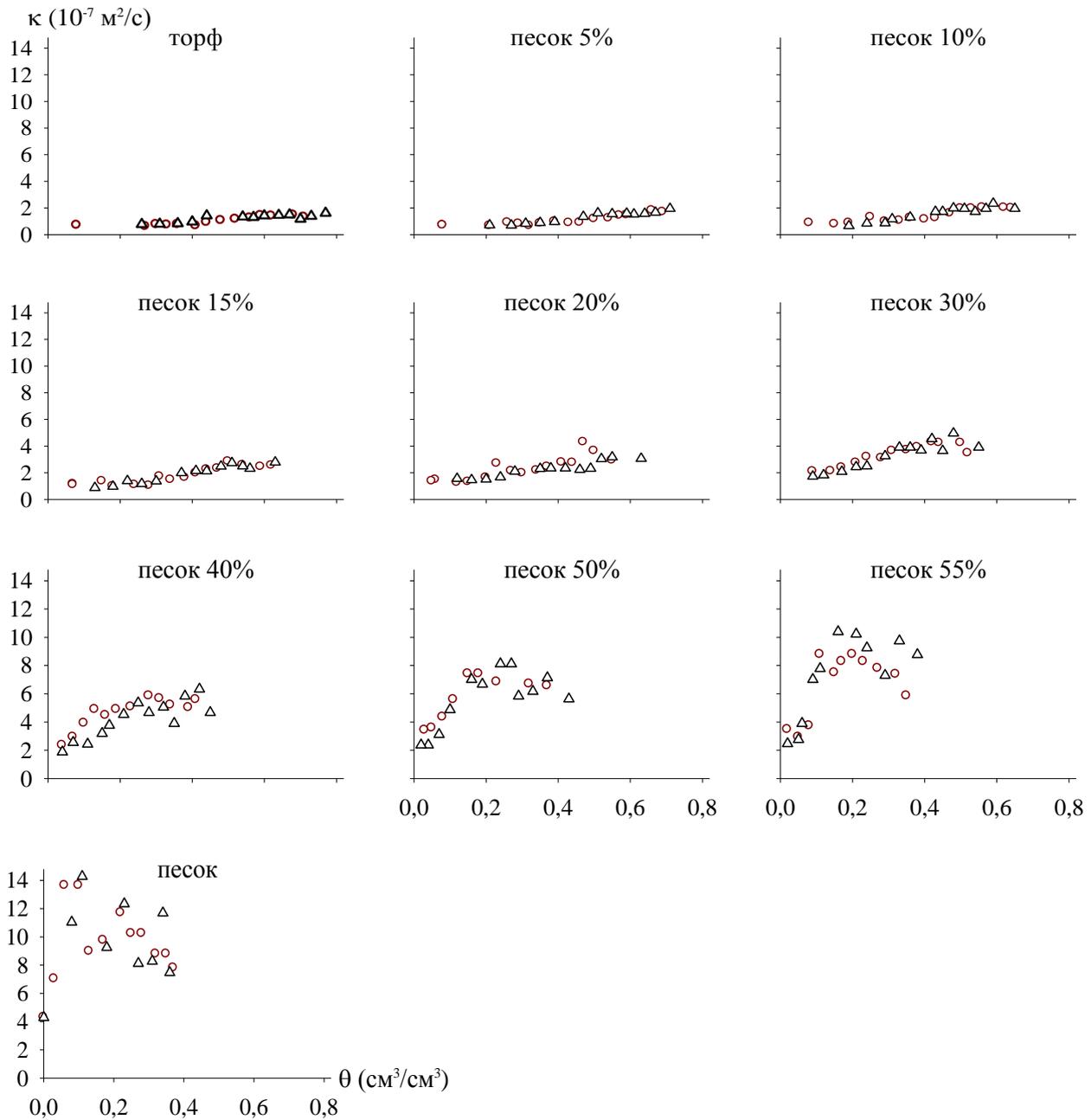


Рис. 3. Зависимости температуропроводности (κ) от влажности (θ) для торфа, песка и смесей с различным объемным содержанием песка: серия 1 – кружки, серия 2 – треугольники.

Температуропроводность воздушно-сухих образцов варьировала от $0.65 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для образца, состоящего из материала пахотного горизонта торфяной окультуренной почвы с 10% примеси песка, до $7.01 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для чистого песка. Температуропроводность при капиллярном увлажнении менялась от $1.30 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для торфяного материала до $8.77 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ для чистого песка. Таким образом, температуропроводность исследованных материалов различалась более чем в 10 раз в воздушно-сухом состоянии и почти в 7 раз – при капиллярной влажности.



Заключение

Добавление песка к торфяному материалу существенно увеличивает температуропроводность последнего лишь при условии, что объем добавленного кварцевого материала составляет не менее 15–20%. Особенно резкие изменения температуропроводности наблюдаются при содержании песка 55% и более. Это позволяет говорить о том, что, наоборот, очень небольшие добавки торфа в кварцевый песок существенно снижают температуропроводность последнего.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

- Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П., Банников М.В., Павлова Е.Б. (1995) Влияние разных способов внесения песка в осушенные торфяные почвы на их гидротермический режим. Почвоведение **8**, 969–976.
- Ковалев Н.Г., Поздняков А.И., Мусекаев Д.А., Позднякова Л.А. (1998) Торф, торфяные почвы, удобрения. Тверь, Изд-во ВНИИМЗ Россельхозакадемии. 240 с.
- Когут Б.М., Большаков В.А., Фрид А.С., Краснова Н.М., Бродский Е.С., Кулешов В.И. (1993) Аналитическое обеспечение мониторинга гумусового состояния почв. Методические указания. М.: Изд-во РАСХН. 73 с.
- Машинский В.Л., Суденкова Н.А., Воронин А.М., Цыкановский Е.Ю., Сеницина Л.Б., Горбачевская О.А. (2001) Пособие по озеленению и благоустройству эксплуатируемых крыш жилых и общественных зданий, подземных и полуподземных гаражей, объектов гражданской обороны и других сооружений. М., Моспроект. 153 с.
- Arhangelskaya T.A. (2004) Thermal Diffusivity of Gray Forest Soils in the Vladimir Opolie Region. Eurasian Soil Science **37**(3), 285–294.
- Brovka G.P., Rovdan E.N. (1999) Thermal conductivity of peat soils. Eurasian soil science **32**, 533–537.
- Walczak R., Rovdan E., Witkowska-Walczak B. (2002) Water retention characteristics of peat and sand mixtures. International Agrophysics **16**, 161–165.
- Witkowska-Walczak B., Bieganowski A., Rovdan E. (2002) Water-air properties in peat, sand and their mixtures. International Agrophysics **16**, 313–318.
- Zhao Y., Si B. (2019) Thermal properties of sandy and peat soils under unfrozen and frozen conditions. Soil & Tillage Research **189**, 64–72.



УДК 631.43

ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕГО ОРГАНОГЕННОГО ГОРИЗОНТА ГРУБОГУМУСНЫХ СЕРОГУМУСОВЫХ ПОЧВ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М.

Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия
galina.kashulina@gmail.com

THE INFLUENCE OF LANDSCAPE POSITION ON TEMPERATURE OF THE UPPER ORGANIC HORIZON OF UMBRISOLS, SVALBARD

Kashulina G., Litvinova T., Korobeinikova N.
Polar-alpine botanical garden-institute KSC RAS, Apatity, Russia

Annotation: Results showed that altitude has no evident effect on soil temperature. However, exposure, slope steepness and the shape of the surface have a significant impact on soil temperature. Each site, depending on the combination of its landscape features, has its own pattern of the annual cycle of soil temperature.

Введение

Благодаря влиянию теплого атлантического течения, а также теплых и влажных воздушных потоков из Атлантики юго-западное побережье острова Западный Шпицберген характеризуется более мягкой зимой, более теплым и продолжительным летом, более высоким количеством атмосферных осадков и более мощным снежным покровом по сравнению с расположенными на той же широте более восточными арктическими регионами (Добровольский, 1990; Горячкин, 2010). Глубина залегания вечной мерзлоты составляет 1-2 м (Осокин, Сосновский, 2008).

Благодаря более благоприятным климатическим условиям и глубокому залеганию вечной мерзлоты (1-2 м, Осокин, Сосновский, 2008) здесь под сомкнутым мохово-кустарничковым покровом формируются хорошо развитые арктические горные серогумусовые грубогумусные почвы. Эти почвы имеют следующий набор горизонтов: O(AO)-(Oh, AOh)-AYao-AYaoC. Их характерной особенностью является высокая и глубокая гумусированность профиля (Переверзев, 2012).

Высокое содержание органического вещества в арктических почвах было отмечено многими исследователями и объяснялось заторможенностью процессов трансформации растительных остатков и их накоплением в почве вследствие низких температур и короткого периода с положительными температурами (Васильевская, 1980). Однако эксперименты по разложению растительных остатков *in situ* продемонстрировали достаточно высокую биологическую активность серогумусовых грубогумусных почв на юго-западном побережье Шпицбергена (Кашулина и др., 2018). В данном докладе будут представлены результаты наблюдений за температурным режимом почв на стационарных площадках, где проводились эксперименты по разложению растительных остатков.

Объекты и методы

Температура почвы определялась на 4 стационарных площадках, расположенных по геопрофилю, пересекающем горный хребт Гренфьорд выше пос. Баренцбург (табл. 1). Номер площадки соответствует ее абсолютной отметке над уровнем моря. Температурные



регистраторы марки ГР-2 были установлены на глубине 2 см (нижняя часть горизонта О). Температура фиксировалась 8 раз за сутки с интервалом 3 часа, начиная с 2 часов, в период с 20 июля 2016 по 2 августа 2017 года. Температуру воздуха за этот период представляют архивные данные гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» ([http:// www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)).

Таблица 1. Местоположение стационарных площадок

| Площадка | Координаты | Рельеф | Уклон, ° |
|----------|----------------------------------|--|----------|
| Пл. 92 | N: 78°03'30.5" E: 14°13'23.4" | Пологий солифлюкционный склон, западная экспозиция | 15 |
| Пл. 141 | N: 78°03'33.4" E: 14°13'50.8" | Вторая морская терраса, западная экспозиция | 5 |
| Пл. 252 | N: 78°03'41.8" E: 14°14'25.6" | Вершина горного хребта, западная экспозиция | 2-3 |
| Пл. 244 | N: 78°03'40.4" E: 14°14'41.2" | Противоположный крутой склон, восточная экспозиция | 45 |

На пл. 92, 141 растительность представлена сплошным покровом из мха и кустарничков, на пл. 252 – этот покров фрагментарный, а на пл. 244 – растительность представлена отдельным пятном из мхов и лишайников среди россыпей камней. Почвы на площадках 92, 141 и 252 представлены серогумусовыми грубогумусными почвами, а на пл. 244 – литоземами.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты (табл. 2), для каждой площадки свойственно свое сочетание усредненных за год температурных показателей. Если по продолжительности периодов с отрицательными и положительными среднесуточными температурами площадки, незначительно различаются друг от друга, то по суммам положительных и отрицательных температур различия между площадками были уже более очевидны, при этом их распределение не всегда соответствовало их распределению по абсолютной отметке. Так, самая высокая сумма и отрицательных и положительных среднесуточных температур была обнаружена на пл. 252, расположенной на вершине хребта. Наибольшее количество дней с температурой > 5 °С и сумма среднесуточных температур >5 °С была приурочена к площадкам, занимающим самые верхние позиции ландшафта- пл. 252 и 244. Наименьшие значения этих показателей были свойственны пл. 141, расположенной на второй морской террасе, т.е., в средней части геопрофиля.

Положительные среднемесячные температуры воздуха на метеостанции и в почвах на всех площадках держались 5 месяцев в году: с июня по октябрь (рис. 1). В летние месяцы (июнь-август среднемесячные температуры воздуха и почв на всех площадках близки. В отличие от сезонно-промерзающих почв, температура верхнего органогенного горизонта почв в осенний период снижалась быстрее, чем воздуха. Это обусловлено тем, что из-за вечной мерзлоты, фронт отрицательных температур проникает не только с воздуха, но и поднимается с глубины. Очевидно присутствие вечной мерзлоты обуславливает и другую особенность температурного режима почв: снежный покров не эффективно защищал почву от промерзания в зимний период. В результате температура верхнего слоя почв на всех площадках держалась в отрицательной области весь зимний период и продолжала реагировать на резкие изменения температуры воздуха.



Таблица 2. Основные показатели температурного режима почв на глубине 2 см на стационарных площадках и воздуха на метеостанции Баренцбург за период с 20 июля 2016 по 19 июля 2017 года

| Показатель | Пл. 92 | Пл. 141 | Пл. 252 | Пл. 244 | Воздух |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| Температура, °С | | | | | |
| Средняя | -1.9 | -1.4 | -2.8 | -1.7 | -2.2 |
| Максимальная среднесуточная | 8.8 | 8.1 | 9.7 | 10.0 | 10.3 |
| Минимальная среднесуточная | -14.7 | -11.0 | -18.0 | -14.7 | -19.9 |
| Абсолютный максимум | 11.1 | 9.6 | 12.1 | 13.7 | 13.2 |
| Абсолютный минимум | -15.6 | -11.0 | -19.6 | -15.5 | -22.3 |
| Диапазон варьирования | 26.7 | 20.6 | 31.7 | 29.2 | 35.5 |
| Сумма отрицательных среднесуточных | -1195 | -1041 | -1564 | -1112 | -1506 |
| Сумма положительных среднесуточных | 517 | 531 | 543 | 511 | 709 |
| Сумма среднесуточных > 5 °С | 259.0 | 235.2 | 345.3 | 349.4 | 359.8 |
| Даты | | | | | |
| Переход через 0°С осенью | 30.10.16 | 18.11.16 | 29.10.16 | 29.10.16 | 21.11.16 |
| Переход через 0°С весной | 1.06.17 | 6.06.17 | 3.06.17 | 3.06.17 | 30.05.17 |
| Установка снежного покрова | | | | | 26.11.16 |
| Сход снежного покрова | | | | | 5.06.17 |
| Продолжительность периода, дней | | | | | |
| С постоянным снежным покровом | | | | | 192 |
| С отрицательными температурами | 211 | 207 | 213 | 208 | 192 |
| С положительными температурами | 154 | 158 | 152 | 157 | 173 |
| Количество дней | | | | | |
| со среднесуточной температурой > 5 °С | 40 | 38 | 53 | 50 | 55 |

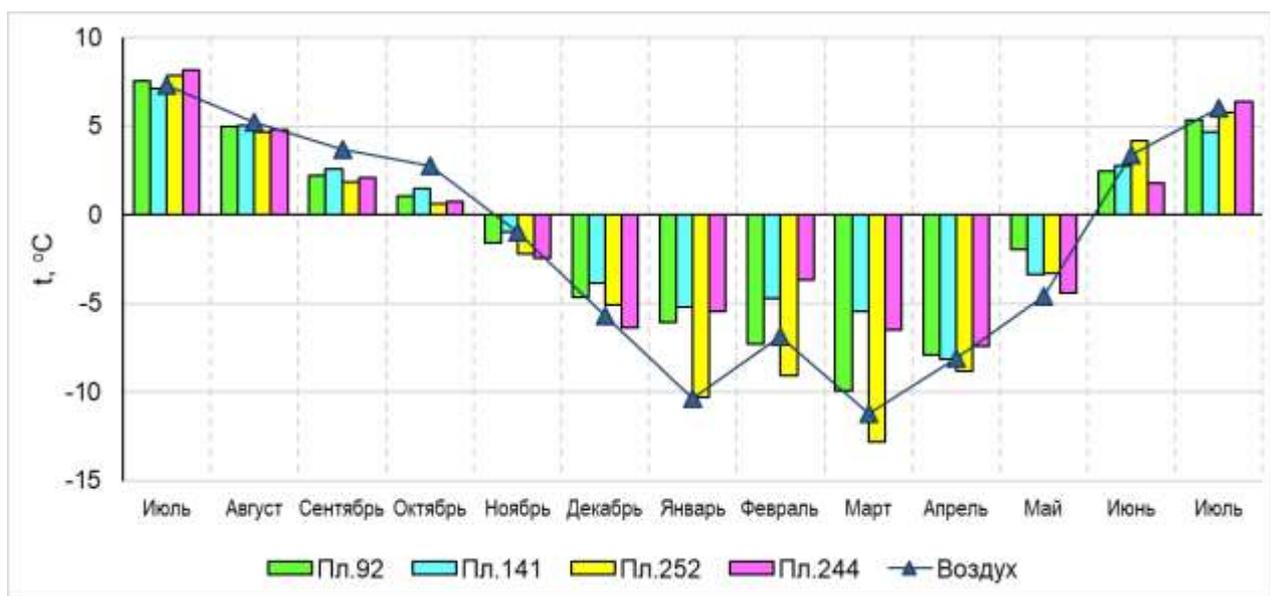


Рис. 1. Среднемесячные температуры почв на стационарных площадках и воздуха на метеостанции Баренцбург с 20 июля 2016 по 31 июля 2017 года



Распределение среднемесячных температур по площадкам объясняет неоднозначность распределения температурных показателей, рассчитанных за год (табл. 2): каждая площадка имеет свои особенности годового цикла, и распределение между площадками среднемесячной температуры различно в разные месяцы (рис.) Так в июле 2016 и 2017 гг. самыми теплыми были площадки, занимающие самое высокое положение в ландшафте: пл. 244 (крутой восточный склон хребта) и пл. 252 (вершина хребта, не экранирована рельефом). Наоборот, самой холодной была пл. 141 (вторая морская терраса, наименьший наклон поверхности). В августе при небольшом снижении температуры воздуха, различия между площадками по температуре почв сглаживались. В сентябре и октябре при небольшой продолжительности дня, наоборот, почва на пл. 141 была наиболее теплой, а пл. 252 и 244 – самыми холодными.

В течение 7-ми месяцев (с ноября по май) среднемесячные температуры, и воздуха, и почв находились в отрицательной области. При этом, именно в эти зимние месяцы наблюдаются самые высокие различия между площадками по температуре. В этот период, значительно более холодной площадкой является пл. 252 на вершине хребта. Скорее всего, это обусловлено тем, что снег сдувается с выпуклой поверхности на этом месте и температура верхнего слоя почвы здесь четко следует за температурой воздуха. Сдуванием снега (свидетельства очевидцев) объясняются и низкие температуры почвы на пл. 92 в зимний период. В то же время при отсутствии снега почва на пл. 252 и 92, начинает быстрее прогреваться весной. Наименее холодными в зимний период были почвы на пл. 141 и 244 с постоянным и достаточно мощным снежным покровом. Однако весной почва на этих площадках начинала прогреваться позднее, особенно на пл. 244, где снег лежал до 20 июня.

Заключение

Как показали результаты наблюдений, высота в диапазоне от 92 до 252 м н.у.м. на обследованном геопрофиле в юго-западной части острова Западный Шпицберген не оказывает ощутимого влияния на температурный режим почв. Вместе с тем, такие характеристики ландшафта, как экспозиция и крутизна склона, а также форма поверхности оказывают существенное влияние на температурный режим почв, не только определяя приход солнечной радиации в летний период, но и перераспределяя снег в зимний период. Каждая площадка, в зависимости от сочетания ее ландшафтных характеристик, имеет свои характерные особенности годового цикла температуры почв.

Литература

- Васильевская В.Д. (1980) Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 235.
- Горячкин С.В. (2010) Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 414.
- Добровольский В.В. (1990) Геохимия почв Шпицбергена. *Почвоведение*, 2, 5-20.
- Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Сидорова О.Р. (2018) Влияние ландшафтного положения на эмиссию CO₂ почвами в окрестностях пос. Баренцбург, Шпицберген. *Вестник Кольского научного центра РАН*, 6, 199-204.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. (2008) Влияние климатических изменений на термический режим многолетнемерзлых пород на архипелаге Шпицберген. *Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики*, 8, 280-284.
- Переверзев В.Н. (2012) Почвы побережий фьордов острова Западный Шпицберген. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 122.



УДК 631.43

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ДВУХ В РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ

Кашулина Г.М., Литвинова Т.И., Коробейникова Н.М.

Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

galina.kashulina@gmail.com

SOIL TEMPERATURE REGIMES OF TWO SITE WITH DIFFERENT DEGREE OF DISTURBANCE AT
DAMAGED BY EXTREME POLLUTION ECOSYSTEM, KOLA PENINSULA

Kashulina G., Litvinova T., Korobeinikova N.

Polar-alpine botanical garden-institute KSC RAS, Apatity, Russia

Annotation: Soil temperature regime was studied in the damaged ecosystem near "Severonikel" industrial complex. Results have shown that, depressed ground vegetation continues to protect soil from sharp fluctuations in the temperature. In contrast, complete ground vegetation disturbance increases the fluctuations and daily average temperatures during summer.

Введение

Медно-никелевый комбинат «Североникель» на Кольском полуострове, является одним из крупнейших и длительно действующих источников выбросов SO_2 и тяжелых металлов на Севере Европы. Изменения химических свойств почв (в том числе, загрязнение почв тяжелыми металлами, кислотного и питательного статуса), а также их морфологического сложения под воздействием выбросов этого предприятия уже достаточно хорошо изучены (Кашулина, 2002). Физические свойства техногенно-трансформированных почв, однако, практически не были исследованы. Восполняя этот пробел, на площадке П-1 комплексного мониторинга, расположенной в 8 км на север от комбината «Североникель» (Кашулина, 2018) были проведены рекогносцировочные исследования температурного режима деградированных подзолов.

Объекты и методы

Растительность на площадке мониторинга П-1 представлена березняком, разросшимся после значительного снижения выбросов в последние 20 лет. Напочвенный растительный покров на большей части территории этой площадки был полностью разрушен. Почва представлена деградированным подзолом с эродирующим горизонтом О на поверхности. По данным химического анализа, эта площадка является одной из самых загрязненных: содержание Ni в верхнем эродирующем горизонте О было в 2600 (Кашулина, 2018), а в снежном покрове в 1200 раз выше фона (Kashulina et al., 2014).

Температурные регистраторы марки ТР-2 фиксировали температуру верхнего органогенного горизонта почв на глубине 2 см на двух участках: на открытом месте в эродирующей подстилке подзола без напочвенного покрова – участок техногенная пустошь и под кроной березы с небольшой угнетенной куртиной вороники (*Empetrum hermaphroditum*) – участок «вороника». Наблюдения велись с 22 сентября 2014 года по 11 июля 2015 года. Температуру воздуха за этот период представляли данные метеостанции «Мончегорск» (URL: <http://www.rp5.ru>), расположенной в 4 км на ВЮВ от площадки мониторинга.



Результаты и обсуждение

Как показали результаты, почвы пустоши техногенной и под куртиной угнетенной воронки значительно различались по всем общим температурным показателям (табл.). Так, средняя за время исследований (с 22 сентября 2014 года по 11 июня 2015 года) температура воздуха составила -2.9 °С. В почвах на обоих участках эта величина была в области положительных температур. При этом средняя температура за период исследований в почве пустоши была на 0.9 °С выше по сравнению с почвой под воронкой.

Благодаря темной окраске и лучшему прогреванию днем в летний период максимальная среднесуточная температура в почве пустоши была близка аналогичному показателю для воздуха и почти на 4 °С превышала температуру почвы под воронкой. В то же время минимальные среднесуточные температуры в почвах на обоих участках оказались значительно менее низкими по сравнению с воздухом, благодаря теплоизоляционным свойствам снежного покрова в зимний период. Минимальная среднесуточная температура в почве под воронкой при этом была на 2 °С выше по сравнению с пустошью.

Таблица. Основные показатели температурного режима почв на глубине 2 см на участке с полностью разрушенным напочвенным покровом (Пустошь) и под угнетенной куртиной воронка (Воронка), а также воздуха по данным метеостанции «Мончегорск» (www.rp5.ru)

| Показатель | Пустошь | Воронка | Воздух |
|--|----------|----------|----------|
| Температура, °С | | | |
| Средняя за весь период наблюдений | 1.1 | 0.21 | -2.9 |
| Максимальная среднесуточная | 14.2 | 10.1 | 15.7 |
| Минимальная среднесуточная | -5.9 | -3.9 | -34 |
| Абсолютный максимум | 23.2 | 13.1 | 20.9 |
| Абсолютный минимум | -7.5 | -3.9 | -35.4 |
| Диапазон варьирования | 30.7 | 17.0 | 56.3 |
| Сумма отрицательных среднесуточных | -109 | -234 | -1168 |
| Сумма положительных среднесуточных | 395 | 287 | 436 |
| Сумма среднесуточных > 5 °С | 287 | 191 | 290 |
| Сумма среднесуточных > 10 °С | 124 | 10 | 141 |
| Даты | | | |
| Переход к отрицательным температурам | 21.10.14 | 21.10.14 | 10.10.14 |
| Переход к положительным температурам | 2.05.15 | 6.05.15 | 30.03.15 |
| Установка постоянного снежного покрова | - | - | 12.11.14 |
| Сход снежного покрова | - | - | 10.05.15 |
| Продолжительность периода, дней | | | |
| Залегания постоянного снежного покрова | | | 179 |
| С отрицательными среднесуточными температурами | 112 | 182 | 160 |
| С положительными среднесуточными температурами | 150 | 80 | 102 |
| Количество дней | | | |
| со среднесуточной температурой > 5 °С | 44 | 26 | 45 |
| со среднесуточной температурой > 10 °С | 11 | 1 | 12 |

Абсолютный температурный максимум в почве пустоши был выше не только по сравнению с почвой под воронкой, но и по сравнению с воздухом. Абсолютная минимальная



температура в почве пустоши, наоборот, оказалась более низкой, по сравнению с почвой под вороникой. Причем минимальные абсолютные температуры почвы на разных участках были отмечены в разное время. В почве пустоши абсолютная минимальная температура ($-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) была отмечена утром 6 ноября после первого резкого снижения температуры воздуха ночью до $-11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда мощность снега была еще менее 0.5 см . В почве под вороникой минимальная абсолютная температура ($-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) была отмечена 12-14 января, когда температура воздуха нескольких предшествующих дней держалась около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это резкое снижение температуры почвы под вороникой было менее губительно для растения. Во-первых, оно наступило позже, когда растение уже находилось в стадии полного покоя. Во-вторых, оно было менее резким и, в третьих, не сопровождалось еще более резким снижением температуры для надземной части растения из-за достаточно мощного слоя снега.

Диапазон варьирования температуры за период наблюдений в почве под вороникой оказался самым низким и составил всего $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о том, что даже угнетенный кустарничек продолжает регулировать температуру почвы и поддерживать ее температурный гомеостаз. Диапазон варьирования температуры в почве пустоши значительно выше. Он обеспечен более интенсивным прогреванием в летний период из-за темной окраски и большей чувствительностью к первым эпизодам резкого снижения температуры воздуха до того, как установится постоянный снежный покров. Вместе с тем, благодаря защите снежного покрова, диапазон варьирования температуры почвы пустоши за время наблюдений был почти в 2 раза ниже по сравнению с воздухом. Диапазон варьирования температуры воздуха по данным метеостанции за период наблюдений составил почти $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наблюдения также выявили значительные различия между участками по продолжительности периода с отрицательными среднесуточными температурами: в почве пустоши он составил всего 112 дней, а в почве под вороникой – 182 дня. По количеству дней со среднесуточными температурами более > 5 и $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ почва пустоши сравнялась с воздухом. В почве под вороникой продолжительность этих периодов была значительно меньше. Соответственно, и суммы биологически активных температур за период исследований в почвах пустоши также были значительно выше по сравнению с почвами под вороникой.

Соотношение среднесуточных температур почв между разными участками не были постоянными и зависели от периода времени. Температура почвы пустоши в дневное время в конце сентября еще прогревалась солнцем и была выше, чем в почве под вороникой на $0.5\text{--}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ночное время, наоборот, температура почвы под вороникой была выше на $0.5\text{--}1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Благодаря способности почвы под вороникой удерживать температуру в ночное время, а также большей продолжительности темного периода суток, среднесуточная температура почвы под вороникой в конце сентября была на $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше по сравнению с пустошью.

В октябре – первой декаде ноября среднесуточная температура почвы пустоши более четко следовала за ходом температуры воздуха. В этот период снижение температуры почвы под вороникой запаздывало на 1-2 дня и было менее значительным по сравнению с почвой пустоши. Например, 6 ноября, когда среднесуточная температура почвы пустоши резко снизилась до минимальной за весь период наблюдений ($-5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$), температура почвы под вороникой была почти на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше. Т.е., в осенний период, пока не образовался постоянный снежный покров, почва пустоши существенно уступала почве под вороникой по способности поддерживать температурный гомеостаз.

Среднесуточные температуры воздуха в период с 12 ноября до 30 марта варьировали от -34.0 до $+4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Благодаря термоизоляционным свойствам снежного покрова варьирование среднесуточных температур почвы на обоих участках было значительно ниже. При этом



соотношение среднесуточных температур почвы между участками в зимний период изменилось: температура почвы под воронкой в зимний период, наоборот, была устойчиво ниже, чем в почве пустоши. Причиной более высокой чувствительности температуры почвы под воронкой на резкие изменения температуры воздуха в зимний период могут быть обусловлены меньшей плотностью снега под кроной по сравнению с межкроновым пространством. Поскольку теплопроводность снега и интенсивность воздухообмена почвы с атмосферой зависит не только от мощности снега, но и от его плотности (Осокин и др., 2013).

Устойчивый переход через ноль в сторону положительных температур для воздуха произошел 30 марта 2015 года. В почвах это событие было отмечено значительно позже. В отличие от осеннего периода, в весенне-летний период среднесуточная температура почвы пустоши была уже устойчиво выше (от 0.9 до 4.1 °С) по сравнению с почвой под воронкой.

Заключение

Таким образом, несмотря на угнетенное состояние напочвенного покрова в техногенно трансформированной экосистеме около комбината «Североникель» он продолжает выполнять свои функции и предохраняет почву от резких колебаний температуры. Полное разрушение напочвенного покрова и выход на поверхность темноокрашенного органогенного горизонта ведет к значительному усилению суточных колебаний температуры верхних слоев почв и повышению дневных и среднесуточных температур в летний период. Иссущение почвы в летний период, а также одновременные резкие снижения температуры и почвы и воздуха осенью могут быть дополнительным к экстремальному загрязнению стресс-факторами для растений и ограничивать самовосстановление древесного яруса в техногенно нарушенных экосистемах.

Литература

- Кашулина Г.М. (2002) Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, Часть 1 -158 с., Часть 2 – 234 с.
- Кашулина Г.М. (2018) Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове. *Почвоведение* 4, 493-505.
- Осокин Н.И., Сосновский, А.В., Чернов Р.А. (2013) Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление. *Лёд и Снег* 3 (123), 63-70.
- Kashulina G., Caritat P. de, Reimann C. (2014) Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis. *Atmospheric Environment* 89, 672-682.



УДК 631.4

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЧВАХ МЕЛОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ

Ковда И.В.¹, Рябуха А.Г.², Поляков Д.Г.²

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
ikovda@mail.ru

²Институт степи УрО РАН, Оренбург, Российская Федерация
annaryabukha@yandex.ru

CRYOGENIC PROCESSES IN SOILS OF CHALKY LANDSCAPES, SOUTH OF THE ORENBURG REGION

Kovda I.V., Ruabukha A.G., Polyakov D.G.

¹V.V. Dokuchayev Soil Science Institute, Moscow, Russia,

²Steppe Institute UB RAS, Orenburg, Russia

Annotation: Cryogenic features have been found and investigated in soils under steppe vegetation formed on thin loamy parent material underlined by hard chalk in arid continental environment in Orenburg region. The landscape consists of regular network of microhighs and microdepressions. Soils have a set of macro-, meso- and micro cryogenic features and are very similar to cryoarid soils of permafrost regions. We believe that these landscapes and soils combine the late Pleistocene cryogenic network with modern cryogenic functioning similar to permafrost regions due to subsoil water input, deep freezing and hard rock underlining.

Введение

На территории центра и юга Восточно-Европейской равнины, в частности на Среднерусской, Калачской, Приволжской и Подольской возвышенностях, Общем Сырте и Подуральском плато встречаются участки с выходом на поверхность или близким залеганием меловых пород. Выходы меловых пород отмечаются на склонах речных долин и балок, стенках оврагов, возвышенных междуречьях, куполах останцов и гряд и часто соответствующим образом отражены в топонимике (например Белогорье, Белгород и др.).

Подобные меловые ландшафты уникальны, сохраняют эндемичную растительность и характеризуются своеобразным почвенным покровом. На Подуральском плато в Оренбургской области отдельные участки меловых ландшафтов имеют еще более специфический облик, получивший название «меловые полигоны» и представляют собой участки с выраженным микрорельефом, состоящим из упорядоченного чередования вытянутых микропонижений и микроповышений, образованных выходами мелового материала на поверхность в виде пятен. В Оренбургской области подобный микрорельеф встречается в пределах меловых ландшафтов Соль-Илецкого и Акбулакского районов, где они формируют локальные участки площадью от 5 до 10 га с четкими границами, обычно округлой формы. Подобные участки сосредоточены в окрестностях сел Новопавловка, Покровка, Межгорный Акбулакского района и Троицк Соль-Илецкого района.

На одном из участков подобных меловых полигонов нами было проведено их более детальное изучение с целью уточнения генезиса и современного функционирования.

Объекты и методы

Объекты

Исследуемый участок расположен в районе села Новопавловка Акбулакского района Оренбургской области, на слабопологом склоне к реке Акмол на абсолютной высоте около 185 м над уровнем моря (Рис. 1). Территория сложена верхнемеловыми породами



маастрихтского яруса, перекрытыми маломощной толщей суглинистого делювиального материала и относится к Подуральско-Илекской возвышенной степной провинции.

Юго-запад Оренбургской области характеризуется континентальным климатом со среднегодовой температурой $+4^{\circ}\text{C}$, холодной малоснежной зимой (9 средняя Января -15°C , высота снежного покрова до 30 см), сильными ветрами, в связи с чем глубина промерзания почв достигает 140 см. Лето жаркое – средняя Июля 21°C . Испарение (800-900 мм) заметно преобладает над осадками (260-390 мм); гидротермический коэффициент составляет менее 0,6 (Географический атлас, 1999).

Растительность типчаково-ковыльная. Грунтовые воды, судя по урезу воды, предположительно находятся на уровне 3-4 м.

Зональный почвенный покров согласно литературным данным представлен черноземами текстурно-карбонатными (Климентьев, 2000).

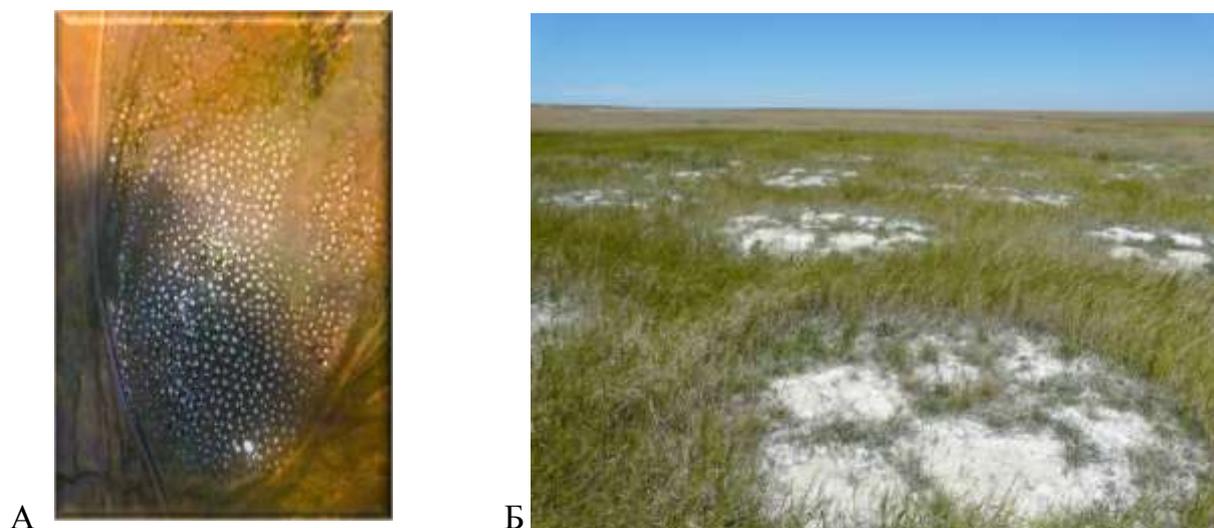


Рис. 1. Меловые полигоны в Акбулакском районе Оренбургской области: А - общий вид ландшафта меловых полигонов; Б - чередование округлых меловых микроповышений и ложбинообразных микропонижений

Методы

Почвы ландшафта меловых полигонов изучены траншейным способом в траншее длиной ~ 4 м и глубиной около 130 см, где отмечается переход к плотным меловым отложениям. Детально изучены все четыре стенки траншеи; каждая из которых имеет свои особенности морфологического строения. Дополнительно сделаны горизонтальные зачистки траншеи на глубинах ~ 30 , 60 и 80 см. Выделены основные горизонты и морфоны в почвах на микроповышении, микросклоне и микропонижении из которых отобраны образцы для лабораторного изучения физических и химических свойств, а также образцы ненарушенного сложения для изучения микростроения почв в шлифах.

Предварительные названия почв Дерново-криометаморфическая, Дерново-криометаморфическая криотурбированная и Палевая даны в соответствии с Полевым определителем почв России (2008).

Результаты и обсуждение

Вскрытые в траншее почвы показали индивидуальное строение почвенных профилей на каждой из стенок траншеи (Рис. 2, 3) и проявление ряда криогенных процессов на макро-, мезо- и микро- уровнях. Также отмечено значительное сходство строения с криогенными почвами в районах многолетней мерзлоты.



А



Б



Рис. 2. Морфологическое строение почв, вскрытых в траншее через меловые полигоны: А, - передняя стенка, Б - задняя стенка

А



Б



Рис. 3. Морфологическое строение боковых стенок почв траншеи: А - левая стенка, Б - правая стенка



В частности, на макроуровне отмечаются следующие признаки: поверхностный округлый микрорельеф и ложбинообразные понижения между микроповышениями; мозаичность строения, интрузии и излияния мелового материала на поверхность микроповышений; клиновидные структуры и трещины, приуроченные к ложбинообразным понижениям; турбированность почвенных горизонтов в зоне к микросклонов и микроповышений. Окраска аккумулятивно-гумусовых горизонтов в почве микросклона и микроповышения имеет тона, характерные для криогумусовых горизонтов.

На мезоуровне в почвах микросклона и микроповышения отмечается наличие криометаморфического горизонта с характерной шлировой криогенной текстурой в виде плитчатости и слоистости толщиной 1-5 см (Рис. 4 А,Б), сортировка крупнозема в почвенной массе и вымораживание щебнистого материала на поверхность. Сортированный меловой крупнозем приобретает окатанные формы.

А



Б



В

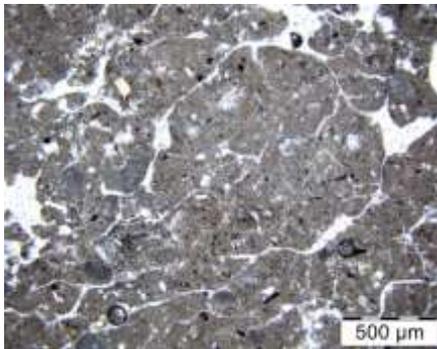


Рис. 4. Шлировая текстура и гранулированные агрегаты на мезо- (А-Б) и микро- (В) уровнях

На микроуровне отмечается микрослоистость, криогенная угловатая и ооидная оструктуренность, а также своеобразное состояние органического вещества в виде обильных мелких фрагментов растительного детрита, которые на макроуровне придают теплые тона окраске почвенного профиля (Рис. 4В).



Выводы

Таким образом, изученные почвы меловых полигонов имеют практически полный набор выраженных криогенных признаков. При этом ряд признаков типичен для почв регионов с современной многолетней мерзлотой и отсутствует в других почвах Оренбургской области несмотря на суровые зимы и глубокое промерзание почв. Мы полагаем, что уникальность ландшафтов меловых полигонов состоит в том, что они сохраняют, а в определенных условиях, и поддерживают палеомерзлотные признаки, заложенные в криоаридных условиях позднего плейстоцена, на фоне которых действуют современные криогенные процессы. Благодаря этому в степных условиях Оренбургской области существуют почвы сходные с почвами-пятен полигональной тундры в условиях многолетней мерзлоты. Сезонные наблюдения показали, что образование меловых пятен на поверхности в условиях дополнительного грунтового увлажнения продолжается в настоящее время, и ранней весной можно наблюдать свежие меловые излияния на поверхность.

В условиях дополнительного увлажнения и благодаря специфическим свойствам элювий мела под воздействием процессов промерзания и оттаивания теряет исходное строение, приобретая при этом свойства тиксотропности. В зимний период, находясь между верхним фронтом промерзания и твердыми меловыми отложениями снизу, под давлением, тиксотропный меловой материал выдавливается на поверхность. Предположительно, почвенные криотурбации также формируются и в настоящее время при отсутствии мерзлоты, однако это требует дополнительного изучения, так как не исключено, что они являются реликтовыми и не происходят в настоящее время.

Благодарность

Работа осуществлена в рамках НИР ОФИЦ УрО РАН (ИС УрО РАН) № ГР АААА-А17-117012610022-5. Участие в полевых работах И.В.Ковда обеспечено за счет Российского научного фонда, грант № 14-27-00133.

Литература

- Географический атлас Оренбургской области. М.: ДИК, 1999. 96с.
Климентьев А.И. Почвы степного Зауралья. Екатеринбург: изд-во УрО РАН, 2000. 436 с.
Полевой определитель почв России. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.



УДК 631.436

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Лапина Л.Э.

Институт водных проблем РАН, г.Москва, Российская Федерация, l.e.lapina@yandex.ru

THE DEPENDENCE OF THE THERMAL DIFFUSIVITY OF THE SOIL TEMPERATURE

Lapina L.E.

Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russian Federation

Annotation: In this paper, on the basis of data on the Bolshezemelskaya tundra, it is shown that this dependence is discontinuous at the point of zero temperature, i.e. for positive temperatures it is one dependence, for negative temperatures it is another.

Введение

Коэффициент температуропроводности - одна из важнейших теплофизических характеристик среды, знание которой необходимо для расчетов потоков тепла в почву. Обзор существующих подходов к расчету этого коэффициента представлен в работе (Микайылов, 2010). Для расчета этой характеристики также используется амплитуда суточного хода температуры на разных глубинах (Дюкарев, 2012).

Объекты и методы

Полевые работы проводились сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН в Ненецком автономном округе на границе южной и типичной тундры в 55 км к северо-востоку от метеостанции Хорей-Вер. На участке исследований зимняя дорога пересекает тундровые природно-территориальные комплексы на песчаных и суглинистых почвах и крупнобугристо-мочажинный болотный комплекс на торфяных мерзлотных почвах. Более подробное описание участка исследований опубликовано в работе (Каверин и др, 2019). Непрерывные температурные измерения проводились в период с 15 августа 2014 по 15 июля 2015 на 5 площадках с выделением ненарушенного участка и в колее зимней дороги, т.е. всего измерения были на 10 участках. Измерения проводились каждые 4 часа на глубинах 0,2,5,10,20 и 40 см.

Анализ данных

Данные аппроксимировались на каждой глубине каждые сутки для каждого участка функцией следующего вида:

$$T = T_0(z) + A(z) \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где T_0 – имеет смысл среднесуточного значения. По такой же формуле рассчитывались и характеристики годового хода температуры и в таком случае параметр T_0 имел смысл среднегодовой температуры. Далее амплитуды как для суточных колебаний. Так и годовых аппроксимировались функцией вида:

$$A = A_0 \exp(-\beta z) \quad (2)$$

Далее вычислялся коэффициент температуропроводности k_T :

$$k_T = \frac{\pi}{\beta^2 \tau}, \quad (3)$$



где τ – период колебаний. Формула (3) предполагает однородность почвы, в случае неоднородности формула (3) легко трансформируется и в качестве β используется логарифм отношения двух амплитуд на различных глубинах. Эта формула приведена в работе (Микайлов, 2010) и в данной работе не используется. Далее, среднегодовые значения температуры аппроксимировались

$$T_0 = C \exp(-\gamma z) + d \quad (4)$$

Такой вид функции выбирался, чтобы обеспечить асимптотические свойства решения уравнения теплопроводности, а именно $T \rightarrow C, z \rightarrow \infty$. Расчеты показали, что на большинстве участков наблюдалось свойство: чем больше амплитуда колебаний на поверхности почвы, тем меньше было значение параметра d , что является проявлением пампинг-эффекта в почвах, о котором написано в работе (Зырянов, 2013).

Методика расчета

Лабораторные измерения мерзлых грунтов, опубликованные в печати (Гаврильев, 2009), подсказали форму зависимости рассматриваемого коэффициента от температуры среды. Ищем зависимость в следующем виде:

$$k_T = aT^2 + bT + c + dT^{-2/3} \quad (5)$$

На каждом участке получили набор суточных значений k_T . И оказалось, что значения их существенно отличаются при положительных и отрицательных температурах. Учитывая, что рассчитанный по формуле (3) коэффициент температуропроводности представляет собой осредненное как по глубине так и по суткам значение, в качестве температуры среды взяли среднее значение температуры по глубине от 0 до 40 см, которое получили с использованием численного интегрирования температурного поля. Таким образом получили набор значений K_T и \bar{T} . Часть значений была отброшена ввиду неадекватности формулы (3) в некоторых условиях. На части участков не получилось ни одного отрицательного значения температуры, средней по глубине. Далее, с помощью метода наименьших квадратов находились значения параметров формулы (5) для всех участков при отрицательных и положительных значениях. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Таблица 1. Параметры расчета формулы (5) для положительных температур

| Объект | Число данных | a | B | c | d |
|---------|--------------|---------|----------|---------|----------|
| 1, антр | 83 | -0.5445 | 4.0988 | 12.36 | -2.743 |
| 1, фон | 42 | -0.1106 | 2.5870 | 6.6284 | -1.394 |
| 2, антр | 61 | -0.4649 | 6.0756 | 1.8972 | -0.0051 |
| 2, фон | 45 | 1.1739 | -11.2958 | 39.0569 | -13.2605 |
| 3, антр | 80 | 0.1724 | -2.6529 | 18.1851 | -0.1886 |
| 3, фон | 95 | -0.2781 | 4.3328 | 0.9808 | -0.1875 |
| 4, антр | 82 | -0.8545 | 5.9277 | 2.4811 | -0.1381 |
| 4, фон | 86 | -0.4627 | 4.4020 | 1.9734 | -0.1598 |
| 5, антр | 63 | -0.1342 | 1.6626 | 3.4278 | -1.2043 |
| 5, фон | 84 | -0.7383 | 5.9718 | 9.6608 | -2.2015 |



Таблица 2. Параметры расчета формулы (5) для отрицательных температур

| Объект | Число данных | a | b | c | d |
|---------|--------------|---------|----------|---------|---------|
| 1, антр | 0 | | | | |
| 1,фон | 29 | -0.3422 | -7.1867 | 20.6243 | 0.0604 |
| 2, антр | 14 | 1.1748 | -7.4140 | 6.4025 | 0.5536 |
| 2, фон | 3 | -25.15 | 4.1721 | 3.8442 | -0.0198 |
| 3,антр | 77 | -0.0032 | -2.9579 | 13.0648 | 1.0812 |
| 3,фон | 96 | -0.0544 | -2.2902 | 24.7535 | 2.4566 |
| 4,антр | 12 | -2.98 | -14.0775 | 15.7084 | 0.4972 |
| 4,фон | 86 | 0.2420 | -1.0879 | 20.6709 | 0.9231 |
| 5,антр | 12 | 73.45 | 4.4109 | 0.0711 | -0.0435 |
| 5,фон | 0 | | | | |

В таблицах 1 и 2 представлены результаты расчетов по формуле (5). 1 и 2 площадки представляют собой песчаники, третий участок – торфяное олиготрофное болото, 4 и 5 площадки представляют собой разновидности суглинков.

Выводы

1. Функция температуропроводности является разрывной в точке 0.
2. Подстилающая поверхность и тип почвы влияет на значения параметров этой функции.
3. В данной работе в качестве температуры среды взято среднее значение температуры по глубине измерений. Скорее всего, это не всегда оправданно, особенно если есть измерения на больших глубинах. Возможно, что и для оценки суточного значения коэффициента температуропроводности необходимо применять не только упрощенный способ расчета по амплитудам колебаний, но и другие подходы. Но это вопрос дальнейших исследований.
4. Очевидно, что функция температуропроводности не будет одной и той же на одном объекте в разные годы, так как коэффициенты ее разложения зависят от суммы выпавших осадков. Для более корректного получения этой зависимости необходимо иметь данные о влажности почвы, которых не было у автора статьи.
5. Учитывая результаты, представленные в табл.1 и 2, можно утверждать, что в целом за год пампинг-эффект будет иметь отрицательное значение, т.е. вести к откачке тепла и тем самым охлаждать почву в поверхностных слоях, поэтому вместе с переносом тепла могут переноситься и парниковые газы, но это требует проведение специальных экспериментов. Метод eddy covariance оценки вклада пампинг-эффекта не даст ввиду отсутствия подробных измерений температуры почвы.

Благодарность

Автор благодарит сотрудников Института биологии Коми НЦ УрО РАН Каверина Д.А., Пастухова А.В. за предоставленные данные и сотрудника Физико-математического института Коми научного центра УрО РАН (г.Сыктывкар) Успенского И.М. за автоматизацию некоторых расчетов, использованных в данной работе.



Литература

- Гаврильев Р.И., Кузьмин Г.П. (2009) Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом //Наука и образование, 2009, N4, с.51-54.
- Дюкарев Е.А.(2012) Амплитуда суточного хода температуры торфяной почвы //Вестник Томского государственного университета, 2012,N365,с..01-205
- Зырянов В.Н.(2013) Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике//Водные ресурсы, 2013, т.40, N3, с.227-239
- Каверин Д.А., Лапина Л.Э., Пастухов А.В., Новаковский А.Б.(2019) Влияние трансформации растительного и почвенного покровов на температуру почв при эксплуатации зимней дороги в Большеземельской тундре//Криосфера Земли,2019, т. XXIII, N1, с.17-27.
- Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В.(2010) Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв //Почвоведение, 2010,N5, с.97-605.



УДК: 631.4

РОЛЬ КРИОГЕНЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ В ПОЧВАХ БУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Лаптева Е.М.¹, Виноградова Ю.А.¹, Ковалева В.А.¹, Перминова Е.М.¹, Чернов Т.И.²

¹Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация
lapteva@ib.komisc.ru

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, г. Москва

THE ROLE OF CRYOGENESIS IN FORMATION OF MICROBIAL COMMUNITIES IN PEAT SOILS OF THE PEAT PLATEAU OF ARCTIC AND SUBARCTIC OF EUROPEAN NORTHEAST OF RUSSIA

Lapteva E.M.¹, Vinogradova Ju.A.¹, Kovaleva V.A.¹, Perminova E.M.¹, Chernov T.I.²,

¹Institute of Biology of Komi SC of the Ural Branch of the RAS, Syktyvkar, Russian Federation

²V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow

Annotation: Specificity of distribution of microorganisms in active layer and permafrost of peat plateau soils is defined. Potential vital bacteria cells and fungus hyphae with undisturbed cell membrane predominate in the active layer. The decrease in the number of the vital bacteria (2-3 times) and their share (to 14-34%) are observed for the suprapermafrost layer, in the permafrost layer they can be up to 60-65% of the total number of cells.

Введение

Экстремальные условия криолитозы определяют значительное разнообразие в температурных режимах почв и подстилающих пород, отрицательные температуры которых, особенно в мерзлых горизонтах и многолетнемерзлых породах (ММП), могут лимитировать функционирование живой составляющей почвенных систем. Совершенствование методических подходов к оценке биоразнообразия микробных сообществ позволило существенно расширить представление об их таксономическом разнообразии в почвах (Добровольская и др., 2009), в т.ч. формирующихся под выраженным влиянием криогенеза. Выяснилось, что отрицательные температуры ММП не являются ограничивающим фактором для распространения и сохранения жизнеспособных бактерий и спор микровицетов (Озерская и др., 2008; Мельников и др., 2011). Торфяные почвы мерзлотных бугристых болот, которые по мнению ряда авторов (Hugelius et al., 2012; Routh et al., 2014) наиболее чувствительны к климатическим изменениям, представляют особый интерес с точки зрения исследования специфики формирования в них микробных комплексов. Снижение глубины залегания кровли ММП в результате потепления климата (Малкова и др., 2011), вовлечение в процессы минерализации почвенного органического вещества торфяной залежи микробных сообществ, находившихся в течение длительного периода времени в нефункционирующем состоянии, может привести к катастрофическим последствиям. Это требует изучения особенностей распределения сообществ эукариот и прокариот в сезонно-талых (СТС) и многолетнемерзлых слоях торфяных почв бугристых болот, в том числе и на территории Европейского Северо-Востока России, что и предопределило цель данной работы.

Объекты и методы

Непосредственными объектами изучения микробных сообществ и оценки специфики их распределения между СТС и ММП послужили торфяные мерзлотные почвы плоскобугристых болот, выделенных на двух болотных массивах, расположенных в



различных биоклиматических подзонах Большеземельской тундры. Первый болотный массив (ключевой участок «Нарьян-Мар») приурочен к лесотундре, второй (ключевой участок «Роговая») – к территории южной тундры. Рассмотренные плоскобугристые болота отличаются по глубине залегания кровли ММП, мощности торфяной залежи и, соответственно, по морфологическому строению торфяных мерзлотных почв. На участке «Нарьян-Мар» мощность торфяной залежи порядка 1.5-2 м (почва торфяная мерзлотная среднемогучная), на участке «Роговая» – около 50-60 см (почва торфяная мерзлотная маломогучная). Глубина сезонной оттайки на момент отбора проб в первом случае составила 50-55 см, во втором – 43-45 см. Образцы торфа из СТС для микробиологических исследований отбирали послойно с учетом изменения в профиле торфяной залежи ботанического состава торфа, степени его разложениости. Отбор почвенных проб из ММП производили методом ручного бурения послойно через каждые 10 см до глубины 100-115 см. При отборе проб соблюдали условия, препятствующие биологической контаминации образцов. Образцы торфа до начала микробиологических исследований хранили при температуре -18...-20 °С.

При проведении микробиологических исследований определяли численность бактерий, спор грибов и длину их мицелия методом прямого микрокопирования с использованием флуорохромных красителей с последующим расчетом величины биомассы микроорганизмов (Методы..., 1991). Препараты для подсчета потенциально жизнеспособных клеток бактерий окрашивали флуоресцентным двухкомпонентным красителем L 7012 (Лысак и др., 2009), спор и мицелия грибов – красителя ФДА (флуоресцеин диацетат). Просмотр препаратов проводили на микроскопе Zeis (Axiovert 200). Математическую обработку полученных данных выполняли с использованием пакета программ Microsoft Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Как показали проведенные исследования, образцы, характеризующие СТС и ММП торфяных почв плоскобугристых болотных массивов лесотундры и южной тундры, существенно различались по общей численности клеток прокариот. Общая численность прокариот в торфяной почве лесотундры варьировала в профиле от 1.3 до 5.0 млрд кл./г, в профиле торфяника южной тундры – от 0.7 до 14.8 млрд кл./г. При этом все проанализированные слои торфяной почвы на ключевом участке «Нарьян-Мар», вскрытые до глубины 115 см, имели один порядок числа клеток бактерий. На участке «Роговая» их численность определялась в большей степени качественным составом анализируемого образца почвы. Все торфяные образцы, как сезонно-талые (глубина 0-43 см), так и находящиеся в мерзлом состоянии (43-52 см), имели близкие значения численности клеток бактерий – 7.6-14.8 млрд кл./г. В минеральной части профиля (на глубине 52-103 см) численность прокариот резко снижается с варьированием в пределах от 0.7 до 1.3 млрд кл./г., что на 1-2 порядка меньше по сравнению с верхними торфяными горизонтами (как талыми, так и мерзлыми) и в 3-7 раз меньше по сравнению с мерзлыми слоями торфа в профиле почвы болотного массива лесотундры. Выявленная разница в количественных параметрах прокариотного комплекса торфяных горизонтов почв рассмотренных плоскобугристых болот может быть обусловлена как спецификой погодных условий года, так и спецификой самих болотных массивов: особенностями их формирования и различиями в ботаническом составе торфа.

Анализ численности потенциально жизнеспособных клеток бактерий и бактерий с нарушенной (поврежденной) клеточной стенкой позволил выявить ряд общих для рассматриваемых торфяных мерзлотных почв закономерностей. В верхних слоях СТС



(глубина 0-20(30) см), как правило, наблюдается преобладание потенциально жизнеспособных клеток бактерий (рис. 1). Их численность и соответственно доля в составе прокариотного комплекса снижается в 2-3 раза в надмерзлотных горизонтах, где температура в течение летнего периода находится в пределах +0.5...+1.0 °С. Однако в мерзлых горизонтах прослеживается присутствие потенциально жизнеспособных бактерий: в минеральных горизонтах ММП в количестве 0.36-0.83 млрд кл./г., в многолетнемерзлой толще торфа – 1.48-1.82 млрд кл./г. Это составляет от 33 до 65 % от общего числа клеток прокариот в горизонтах почв, постоянно находящихся в условиях отрицательных температур.

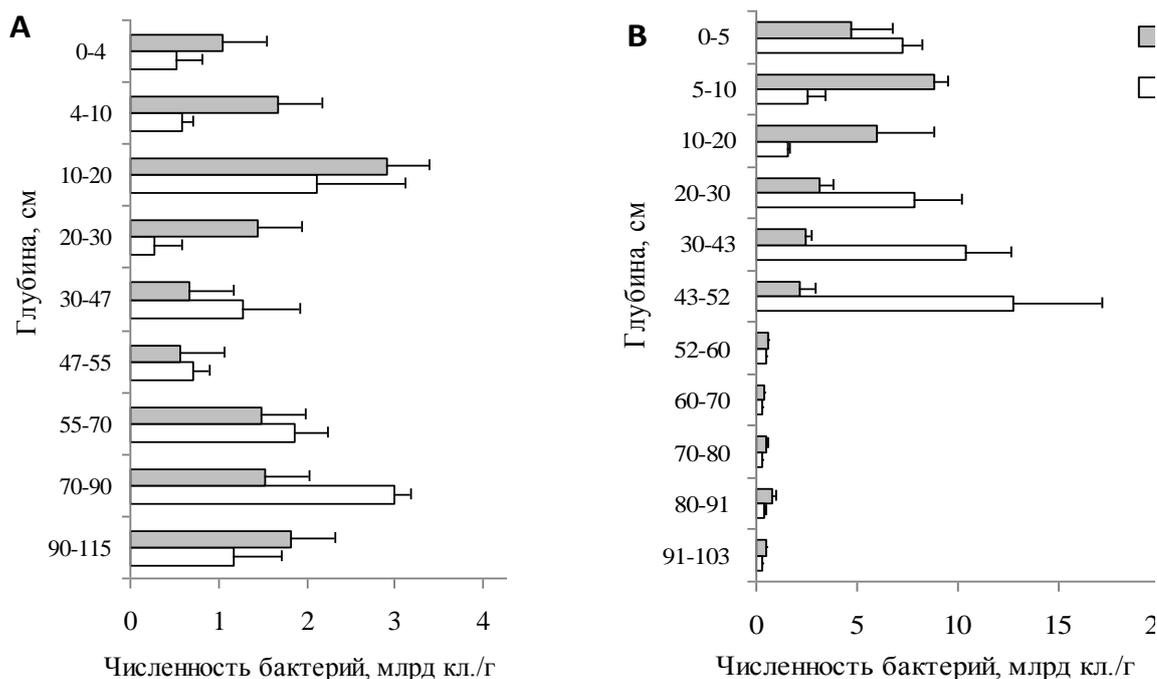


Рис. 1. Профильное распределение бактерий в торфяниках лесотундры (А) и южной тундры (В): 1 – клетки бактерий с ненарушенной мембраной; 2 – клетки бактерий с нарушенной мембраной

Закономерности изменения в системе СТС–ММП торфяной залежи параметров микробной биомассы и вклада в ее сумму биомассы микромицетов рассмотрены на примере торфяной мерзлотной почвы бугристого болота южной тундры (ключевой участок «Роговая»). Как видно из графиков (рис. 2), верхние наиболее прогреваемые слои торфа (глубина 0-10 см) характеризуются максимальной величиной суммарной микробной биомассы. Ее основу (до 92 %) составляет живой мицелий грибов (8.78-9.15 мг/г). При переходе к нижним слоям торфа (20-43 см), в т.ч. находящимся в мерзлом состоянии (43-52 см), и минеральной толще профиля (52-103 см), концентрация микробной биомассы резко снижается, что коррелирует с резким уменьшением вниз по профилю мицелия грибов. В мерзлой толще мицелий грибов (его фрагменты) отсутствуют, однако общее количество спор грибов, фиксируемое методом люминесцентной микроскопии, составляет 31.9-51.0 млн кл./г, что в 1.5-2.5 раза меньше по сравнению с верхними горизонтами. Следует отметить, что в торфянике лесотундры (ключевой участок «Нарьян-Мар») мицелий грибов обнаруживался в мерзлой толще торфа до глубины 90 см (Лаптева и др., 2017). Последнее может быть обусловлено неполной оттайкой торфяной залежи (отбор проб проведен в первой декаде



августа) и, соответственно, наличием фрагментов мицелия грибов, сохранившихся в слое сезонной мерзлоты.

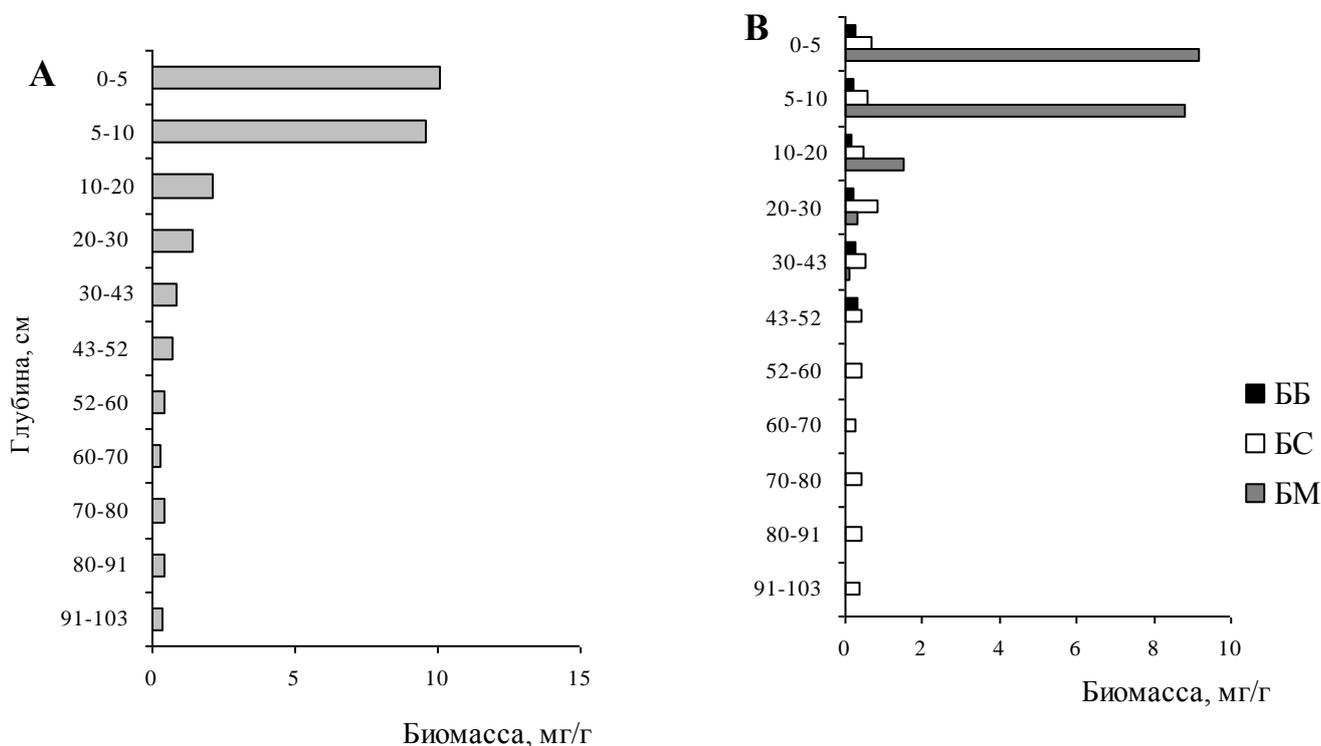


Рис. 2. Профильное изменение суммарной микробной биомассы (А) и ее отдельных компонентов (В) в торфяной почве бугристого болота южной тундры: ББ – биомасса бактерий; БС – биомасса спор; БМ – биомасса мицелия грибов

Оценка жизнеспособности (физиологического состояния) мицелия грибов с применением красителя ФДА (флюоресцеин диацетат) показала, что в торфяной залежи бугристого болота южной тундры содержится в основном жизнеспособный мицелий, доля которого составляет 85-100 % от общего количества учитываемого мицелия. Гифы мицелия с поврежденной клеточной стенкой (1.1 мг/г), равно как и мицелий базидиальных грибов (47 мг/г), встречаются только в самой верхней части торфяной залежи (глубина 0-5 см).

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований определена специфика распределения микроорганизмов в сезонно-талых и многолетнемерзлых слоях почв плоскобугристых болот Большеземельской тундры. Показано, что в верхних, оттаивающих и хорошо прогреваемых в летний период, слоях торфа преобладают потенциально жизнеспособные клетки бактерий и гифы грибов с ненарушенной клеточной мембраной. В надмерзлотных горизонтах, где температура почвы в период сезонного оттаивания находится на уровне +0.5...+1.0 °С, отмечено снижение численности жизнеспособных бактерий в 2-3 раза и их доли до 14-34 % от общего числа клеток прокариот. В мерзлых слоях, в т.ч. и в ММП, они могут составлять от 33 до 65 % от общего числа клеток. Мицелий грибов концентрируется в основном в верхней части сезонно-талого слоя торфяных почв.

Благодарность

Работа осуществлена при финансовой поддержке проекта УрО РАН №18-9-4-40.



Литература

- Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Панкратов Т.А., Лысак Л.В., Звягинцев Д.Г. (2009) Оценка бактериального разнообразия почв: эволюция подходов и методов. *Почвоведение*, № 10, 1222–1232. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12902063>
- Озерская С. М., Кочкина Г. А., Иванушкина Н. Е., Князева Е. В., Гиличинский Д. А. (2008) Структура комплексов микромицетов в многолетнемерзлых грунтах и криопэгах Арктики. *Микробиология*, Т. 77, №4, 542–550. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11031963>
- Мельников В. П., Рогов В. В., Курчатова А. Н., Брушков А. В., Грива Г. И. (2011) Распределение микроорганизмов в мерзлых грунтах. *Криосфера Земли*, Т. XV, № 4, 86–90. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17097597>
- Hugelius G., Routh J., Kuhry P., Crill P. (2012) Mapping the degree of decomposition and thaw remobilization potential of soil organic matter in discontinuous permafrost terrain. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Vol. 117, G02030. DOI: 10.1029/2011JG001873
- Routh J., Hugelius G., Kuhry P. et al. (2014) Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European Russian Arctic. *Chemical Geology*, Vol. 368, 104–117. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.022
- Малкова Г. В., Павлов А. В., Скачков Ю. Б. (2011) Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата. *Криосфера Земли*, Т. XV, №4, 33–36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17097582>
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под. ред. Д. Г. Звягинцева. М. : Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- Лысак Л. В., Лапыгина Е. В., Конова И. А., Звягинцев Д. Г. (2009) Определение физиологического состояния бактерий в почве с помощью люминесцентного красителя L 7012. *Известия РАН. Серия биологическая*, Т. 36, № 6, 750–754. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12951764>
- Лаптева Е.М., Виноградова Ю.А., Чернов Т.И., Ковалева В.А., Перминова Е.М. (2017) Структура и разнообразие почвенных микробных сообществ в бугристых болотах северо-запада Большеземельской тундры. *Известия Коми научного центра УрО РАН*, №4(32), 5-14. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32269399>



УДК 631.436

ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ СЕРОГУМУСОВЫХ ПЕСЧАНЫХ ПОЧВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ

А.А. Лебедев, Т.А. Архангельская, Т.Н. Початкова, З.Н. Тюгай

Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
artem.lebedev@mail.ru

THERMAL DIFFUSIVITY OF LAMMELIC ARENOSOLS AS RELATED TO SOIL MOISTURE

A.A. Lebedev, T.A. Arkhangel'skaya, T.N. Pochatkova, Z.N. Tyugai
Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University

Annotation: This study presents the thermal diffusivity vs. moisture content curves for sandy soils of the East European Plain. The undisturbed soil cores 7 cm in height and 5 cm in diameter were studied using the unsteady-state method. The experimental curves typically demonstrated pronounced peaks at 0.03–0.15 m³m⁻³ moisture contents.

Введение

В статье представлены результаты измерения и последующей параметризации температуропроводности песчаных почв в диапазоне влажности от капиллярного насыщения до воздушно-сухого состояния. Актуальность исследования обусловлена востребованностью данных по температуропроводности почв при решении таких задач, как моделирование продукционного процесса, моделирование глобального цикла углерода, расшифровка данных дистанционного зондирования, конструирование геотермальных систем. Температуропроводность песчаных почв и ее зависимость от влажности обсуждаются в работах (Horton et al., 1983; Abu-Hamdeh, 2003; Gao et al., 2017). Наше исследование является логическим продолжением и дополнением исследований Лукьященко (2012).

Объекты и методы

Объектом исследования были серогумусовые песчаные почвы Воронежской области, образцы которых были отобраны на территории уникального природного объекта – Хреновского бора (рис. 1). Хреновской бор расположен в юго-восточной части Воронежской области на территории Бобровского района и занимает площадь около 40000 га. Хреновской бор имеет вытянутую форму с шириной не более 10 км и расположен вдоль реки Битюг (Демидова, Розанова, 2012).

Исследовали почвы, вскрытые в трех разрезах, которые были заложены на одной песчаной дюне, состоящей из слоёв погребенных серогумусовых почв. Разрезы располагались на одной прямой и вместе представляли собой катену. Разрезы 1 и 2 находились на склоне песчаной дюны, причем разрез 2 находился на расстоянии около 5 м от пересыхающего ручья. Разрез 3 находился на вершине дюны.

Образцы ненарушенного сложения отбирали, врезая в почву тонкостенный металлический цилиндр. Высота и диаметр образцов были равны 7 и 5 см. Дополнительно с тех же глубин отбирали насыпные образцы для лабораторных исследований основных свойств почв.

Температуропроводность образцов определяли в лаборатории, применяя метод регулярного режима с нагреванием образца от 20 до 25°C. Для каждого образца была



проведена серия измерений и получена зависимость температуропроводности от влажности в диапазоне от капиллярного насыщения до воздушно-сухого состояния.



Рис. 1. Положение разрезов на карте юго-западной части России.
Картографические данные © Google, 2019.

Плотность твердой фазы определяли пикнометрически с часовым кипячением (Вадюнина, Корчагина, 1986), гранулометрический состав – пипет-методом с предварительной пирофосфатной диспергацией (Шеин и др., 2001), содержание органического углерода – методом сухого сжигания в токе кислорода (Когут и др., 1993).

При определении названия почвы по гранулометрическому составу использовали классификацию Долгова, основанную на содержании физической глины (1966). Для рыхлых и связных песков отдельно, а также для песков в целом рассчитывали параметры зависимости температуропроводности от влажности, аппроксимируя экспериментальные точки предложенной ранее четырехпараметрической функцией (Архангельская, 2009):

$$\kappa = \kappa_0 + a \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где κ_0 – минимальная температуропроводность почвы; κ_0+a – максимальная температуропроводность, θ_0 и b – параметры формы кривой.

Точность аппроксимации экспериментальных точек расчетными кривыми оценивали с помощью безразмерного индекса согласия Уиллмотта d_r (Willmott et al., 2012):



$$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} & \text{при } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \leq 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|} - 1 & \text{при } \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| > 2 \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases}, \quad (2)$$

где P_i – расчетные оценки, O_i – попарно соответствующие им экспериментальные значения, n – количество пар $P_i - O_i$, \bar{O} – экспериментальное среднее. Когда расчетные оценки приближаются к экспериментальным значениям, d_r приближается к 1.

Индекс Уиллмотта рассчитывали для рыхлых песков, связных песков, а также для песков в целом. Для каждой выборки методом наименьших квадратов определяли параметры k_0 , a , θ_0 , b и рассчитывали температуропроводность почвы при всех тех значениях влажности, для которых имелись экспериментальные значения температуропроводности. Затем для каждой выборки рассчитывали индекс Уиллмотта, используя пары $P_i - O_i$ из этой выборки.

Результаты и обсуждение

Среди исследованных образцов три относились к рыхлым пескам и шесть – к пескам связным (табл. 1). Содержание физической глины в исследованных образцах менялось от 3 до 8% (табл. 1), плотность почвы – от 1.51 до 1.66 г/см³, содержание углерода – от 0.1 до 0.9% (табл. 2). Максимальная температуропроводность наблюдалась при значениях влажности 0.03-0.15 м³/м³ и варьировала в пределах 8.25×10^{-7} – 9.86×10^{-7} м²/с (табл. 2).

Таблица 1. Гранулометрический состав исследованных почв

| № | Содержание частиц (мм), % | | | | | | | Название почвы по гранулометрическому составу |
|-----------------|---------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|-------|---|
| | 0.25–1 | 0.05–0.25 | 0.01–0.05 | 0.005–0.01 | 0.001–0.005 | <0.001 | <0.01 | |
| Разрез 1 | | | | | | | | |
| 1 | 11 | 86 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | песок рыхлый |
| 2 | 14 | 78 | 2 | 1 | 2 | 3 | 6 | песок связный |
| 3 | 15 | 77 | 2 | 1 | 1 | 4 | 6 | песок связный |
| 4 | 13 | 79 | 2 | 2 | 0 | 4 | 6 | песок связный |
| Разрез 2 | | | | | | | | |
| 5 | 11 | 79 | 3 | 1 | 2 | 4 | 7 | песок связный |
| 6 | 16 | 73 | 3 | 1 | 2 | 5 | 8 | песок связный |
| Разрез 3 | | | | | | | | |
| 7 | 8 | 89 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | песок рыхлый |
| 8 | 12 | 80 | 1 | 2 | 1 | 4 | 7 | песок связный |
| 9 | 15 | 80 | 1 | 0 | 1 | 3 | 4 | песок рыхлый |

Зависимости температуропроводности от влажности имели характерный для песков вид с быстрым ростом температуропроводности в области низких значений влажности и постепенным спаданием при ее дальнейшем росте (рис. 2).



В обоих выделенных текстурных классах наблюдался значительный разброс экспериментальных значений температуропроводности, предположительно связанный в первую очередь с вариабельностью плотности почв и содержания в них органического углерода, а в некоторых случаях – с наличием аморфного железа. Температуропроводность рыхлых песков в воздушно-сухом состоянии менялась в пределах $(2.30\text{--}3.18)\times 10^{-7}$ м²/с и была в целом меньше, чем температуропроводность связных песков (от 3.10×10^{-7} до 4.16×10^{-7} м²/с). Значения температуропроводности при капиллярной влажности составляли $(7.03\text{--}7.55)\times 10^{-7}$ м²/с для рыхлых песков и $(6.23\text{--}6.98)\times 10^{-7}$ м²/с для связных песков. Максимальная температуропроводность у образцов из двух исследованных текстурных классов была сопоставима и проявляла тенденцию к уменьшению с увеличением содержания органического углерода и уменьшением плотности (табл. 2).

Таблица 2. Свойства исследованных образцов: плотность ρ_b , плотность твердой фазы ρ_s , содержание органического углерода C , максимальная температуропроводность κ_{\max}

| № | Гор. | Глубина, см | ρ_b , г/см ³ | ρ_s , г/см ³ | C , % | κ_{\max} , м ² /с |
|----------|------|-------------|------------------------------|------------------------------|---------|-------------------------------------|
| Разрез 1 | | | | | | |
| 1 | C | 18–25 | 1.57 | 2.66 | 0.12 | 9.55×10^{-7} |
| 2 | [AY] | 38–45 | 1.66 | 2.64 | 0.33 | 9.77×10^{-7} |
| 3 | [C] | 71–78 | 1.62 | 2.65 | 0.10 | 8.98×10^{-7} |
| 4 | [C] | 110–117 | 1.59 | 2.66 | 0.07 | 9.86×10^{-7} |
| Разрез 2 | | | | | | |
| 5 | AY | 12–19 | 1.62 | 2.62 | 0.77 | 8.44×10^{-7} |
| 6 | [C] | 56–63 | 1.53 | 2.63 | 0.50 | 8.25×10^{-7} |
| Разрез 3 | | | | | | |
| 7 | C | 51–58 | 1.59 | 2.65 | 0.09 | 9.63×10^{-7} |
| 8 | [AY] | 76–83 | 1.51 | 2.63 | 0.93 | 8.37×10^{-7} |
| 9 | [C] | 166–173 | 1.56 | 2.65 | 0.09 | 9.65×10^{-7} |

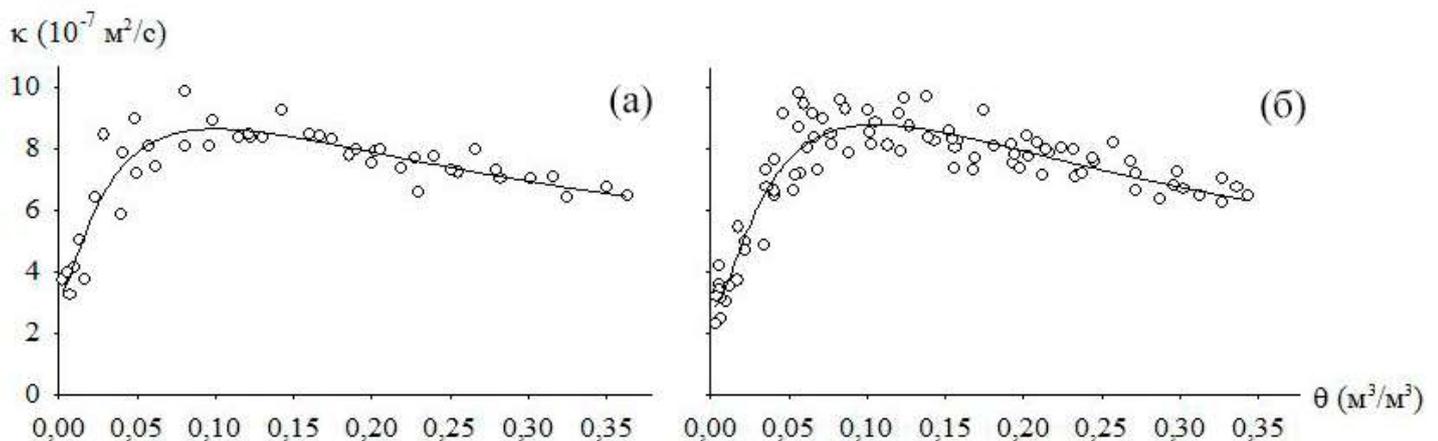


Рис. 2. Зависимости температуропроводности (κ) от объемной влажности (θ) для рыхлых песков (а) и связных песков (б).

Параметры кривых $\kappa(\theta)$ для разных выборок и индексы согласия, отражающие разброс экспериментальных точек относительно этих кривых, приведены в табл. 3. Видно, что параметр κ_0 , соответствующий минимальному значению температуропроводности, уменьшается при переходе от рыхлых песков к пескам связным. Параметр a , описывающий



разницу между максимальной и минимальной температуропроводностью почвы, наоборот, увеличивается при переходе от рыхлых песков к пескам связным. Параметры формы θ_0 и b для рыхлых и связных песков почти не различаются.

Таблица 3. Параметры зависимостей температуропроводности от влажности k_0 , a , θ_0 , b и значения индекса согласия Уиллмотта d_r для рыхлых песков, связных песков, песков в целом

| Название почв по гранулометрическому составу | Количество образцов | k_0 , м ² /с | a , м ² /с | θ_0 , м ³ /м ³ | b | d_r |
|--|---------------------|---------------------------|-------------------------|---|-------|-------|
| Пески рыхлые | 3 | 3.272×10^{-7} | 5.360×10^{-7} | 0.100 | 1.253 | 0.808 |
| Пески связные | 6 | 2.835×10^{-7} | 5.939×10^{-7} | 0.106 | 1.138 | 0.801 |
| Пески | 9 | 2.981×10^{-7} | 5.732×10^{-7} | 0.104 | 1.182 | 0.796 |

Безразмерные индексы согласия составили 0.808 для рыхлых песков и 0.801 для связных песков. Для кривой, построенной для песков в целом, получен индекс согласия 0.796. Увеличение индекса согласия между модельными оценками и экспериментальными данными при разбиении песков на рыхлые и связные оказалось незначительным, что вызывает сомнения в продуктивности группировки песчаных почв по гранулометрическому составу (Pachepsky, Rawls, 1999).

Заключение

Получены параметры зависимости температуропроводности почвы от влажности для рыхлых и связных песков. При использовании предложенной параметризации для расчетной оценки температуропроводности песчаной почвы требуется знать лишь название почвы по гранулометрическому составу и ее влажность.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (проект № 19-04-01298).

Литература

- Архангельская Т.А. (2009) Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности. *Почвоведение* **2**, 178–188.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. (1986) Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат. 416 с.
- Демидова С.В., Розанова М.С. (2012) Состав и свойства органического вещества современных и погребенных почв Хреновского бора. Материалы IV Студенческой Международной Заочной Научно-Практической Конференции Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки. Новосибирск: Изд. Сибирская ассоциация консультантов, 253–259.
- Долгов С.И., ред. (1966) Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука. 259 с.
- Когут Б.М., Большаков В.А., Фрид А.С., Краснова Н.М., Бродский Е.С., Кулешов В.И. (1993) Аналитическое обеспечение мониторинга гумусового состояния почв. Методические указания. М.: Изд-во РАСХН. 73 с.
- Лукьященко К.И. (2012) Температуропроводность почв различного гранулометрического состава и генезиса и ее математическое моделирование. Дис. ... канд. биол. наук. М. 149 с.
- Шейн Е.В., Архангельская Т.А., Гончаров В.М. и др. (2001) Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М.: Изд-во МГУ. 200 с.
- Abu-Hamdeh N.H. (2003) Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering* **86(1)**, 97–102.



- Gao Z., Tong B., Horton R., Mamtimin A., Li Y., Wang L. (2017) Determination of desert soil apparent thermal diffusivity using a conduction-convection algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **122**, 9569–9578. <https://doi.org/10.1002/2017JD027290>
- Horton R., Wierenga P.J., Nielsen D.R. (1983) Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47**, 25–32.
- Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. (1999) Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal* **63**, 1748–1757.
- Willmott C.J., Robeson S.M., Matsuura K. (2012) A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* **32**, 2088–2094.



УДК 51-73

ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ НА СПЕКТРАЛЬНОЕ АЛЬБЕДО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С НЕОДНОРОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Левашова Н.Т.^{1,a}, Гандилян Д.В.^{1,b}, Ольчев А.В.²

¹ Физический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

^a natasha@npanalytica.ru, ^b david.ghandilyan@mail.ru

² Географический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

aoltche@yandex.ru

EFFECTS OF OPTICAL SOIL PROPERTIES ON THE SPECTRAL ALBEDO OF LAND SURFACE WITH NON-UNIFORM VEGETATION COVER: RESULTS OF NUMERICAL EXPERIMENTS WITH THREE-DIMENSIONAL RADIATIVE TRANSFER MODEL

Levashova N.T.¹, Gandilyan D.V.¹, Olchev A.V.²

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia

² Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Russia

Annotation: Effect of optical soil properties on surface albedo was investigated using the developed 3D model of solar radiation transfer in a non-uniform plant canopy. Model scenarios considered various light conditions (sun elevation, direct and diffuse radiation ratio), plant covers of different density. The forest structure was simulated using fractal geometry.

Введение

Влияние оптических свойств почвы на отражательные свойства подстилающей поверхности в значительной степени определяются не только структурой и плотностью растительного покрова, но также и его спектральными оптическими свойствами, высотой солнца над горизонтом, и соотношением прямой и рассеянной радиации в падающем потоке (Росс, 1975; Ross, Myneni, 1991). Отражательные свойства различных типов поверхностей исследовались на протяжении последних десятилетий как с помощью экспериментальных, так и модельных подходов (Knyazikhin et al., 1997). При моделировании процесса отражения и поглощения солнечной радиации растительностью и почвой использовались как достаточно простые одномерные, так и более сложные трехмерные (3D) математические модели (Knyazikhin et al., 1997; Olchev et al., 2009). С помощью подобных моделей можно не только оценить отраженные и рассеянные радиационные потоки в различных спектральных диапазонах, но также, например, решить комплекс обратных задач, связанных в оценке поглощенной растительным покровом солнечной радиации без вклада поглощения почвенным покровом, или с определением оптических свойств почвы по данным отражения в различных спектральных диапазонах (Levashova et al., 2018). Основной целью данного исследования является развитие трехмерной модели радиационного переноса в неоднородном растительном покрове, построенном на основе фрактальной геометрии, и ее применение для оценки вклада отражательных свойств почвы на величину интегрального альбеда земной поверхности.



Объекты и методы

Трёхмерная модель переноса солнечной радиации

Для описания переноса солнечной радиации в неоднородном растительном покрове была использована 3D модель переноса солнечной радиации, основанная на подходе, впервые предложенным Ю.К. Россом (Ross, 1975) и в дальнейшем развитым Россом и Мунени (Ross, Muneni, 1991), и Князихиным и др. (Knyazikhin et al., 1997). Согласно этому подходу функция распределения интенсивности солнечной радиации с длиной волны λ $I_{\lambda}(\mathbf{r}, \Omega)$ в каждой точке пространства внутри растительности $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$ в зависимости от телесного угла $\Omega = \{\varphi, \theta\}$, (θ – зенитный угол солнца, φ – азимутальный угол) определяется как сумма прямой $I_{m,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega)$ и рассеянной $I_{d,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega)$ солнечной радиации. Интенсивность солнечной радиации в каждой точке с координатами \mathbf{r} вычисляется как суммарная интенсивность потока радиации в каждом из направлений, определяемых всеми возможными Ω (Levashova et al., 2018). Распределение интенсивности прямой радиации внутри растительного покрова определяется как $I_{m,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega) = Q_{0,\lambda}(\mathbf{r})\delta(\Omega - \Omega_0)$. Функция $Q_{0,\lambda}(\mathbf{r})$ характеризует плотность вероятности того, что солнечный луч, проходящий на верхнюю границу растительного покрова вдоль направления Ω_0 , достигает некоторой точки \mathbf{r} внутри полога растительности не отражаясь и не рассеиваясь на элементах растительности. Она определяется как (Levashova et al., 2018)

$$Q_{0,\lambda}(\mathbf{r}) = T_{m,\lambda}(\mathbf{r} - l_{r,\Omega_0}, \Omega_0) \exp\left(-\int_0^{l_{r,\Omega_0}} \sigma(\mathbf{r} - s\Omega_0, \Omega_0) ds\right).$$

Здесь $T_{m,\lambda}$ – интенсивность прямой солнечной радиации на верхней границе растительного покрова, l_{r,Ω_0} – расстояние между точкой \mathbf{r} и границей растительности вдоль направления Ω_0 , $\sigma(\mathbf{r}, \Omega)$ – площадь сечения взаимодействия (рассеяния и поглощения) солнечной радиации с элементами растительности. В случае равномерного распределения листьев по углам наклона можно принять $\sigma(\mathbf{r}, \Omega) = 0,5 \cdot LAD(\mathbf{r})$, где $LAD(\mathbf{r})$ – функция распределения плотности листовой поверхности. Интенсивность рассеянной радиации определяется как решение уравнения

$$\left(\Omega \cdot \nabla I_{d,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega)\right) + \sigma(\mathbf{r}, \Omega)I_{d,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega) = \int_{4\pi} I_{d,\lambda}(\mathbf{r}, \Omega')\sigma_{s\lambda}(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega)d\Omega' + \sigma_{s\lambda}(\mathbf{r}, \Omega_0 \rightarrow \Omega)Q_{0,\lambda}(\mathbf{r})$$

с дополнительными условиями зеркального отражения на боковой границе: $I_{d,\lambda}(\mathbf{r}_l, \Omega)|_{(\Omega, \mathbf{n}_l) < 0} = I_{d,\lambda}(\mathbf{r}_l, \Omega)|_{(\Omega, \mathbf{n}_l) > 0}$, (здесь \mathbf{n}_l – внешняя нормаль к границе); условиями $I_{d,\lambda}(\mathbf{r}_t, \Omega) = T_{d,\lambda}/2\pi$ на верхней границе, где $T_{d,\lambda}$ – рассеянная радиация, проходящая в точку $\mathbf{r}_t = \{x, y, z_t\}$ на верхней границе растительности. Граничные условия в каждой точке $\mathbf{r}_b = \{x, y, z_b\}$ на нижней границе растительности непосредственно зависят от коэффициента отражения почвы, ρ_λ и задаются как

$I_{d,\lambda}(\mathbf{r}_b) = \rho_\lambda \int_{(\Omega', \mathbf{n}_b) > 0} I_{d,\lambda}(\mathbf{r}_b, \Omega')\sigma_{s\lambda}(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega)|(\Omega', \mathbf{n}_b)|d\Omega' + \rho_\lambda|(\Omega_0, \mathbf{n}_b)|Q_{0,\lambda}(\mathbf{r})$, где \mathbf{n}_b – внешняя нормаль к поверхности почвы. Функция задает дифференциальное сечение рассеяния лучей, падающих в направлении Ω' и рассеянных в телесном угле $d\Omega$ для данных z и Ω . Она включает в себя две составляющих:

$$\sigma_{s\lambda}(\mathbf{r}, \Omega' \rightarrow \Omega) = \frac{1}{2\pi} LAD(\mathbf{r}) \int_{2\pi^+} |(\Omega', \Omega_L)| (\gamma_{LD}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) + \gamma_{LS}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)) d\Omega_L$$

где $\gamma_{LD}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) = \frac{1}{\pi} \begin{cases} r_{LD}|(\Omega, \Omega_L)|, & (\Omega, \Omega_L)(\Omega', \Omega_L) < 0, \\ t_{LD}|(\Omega, \Omega_L)|, & (\Omega, \Omega_L)(\Omega', \Omega_L) > 0 \end{cases}$ – фазовая функция рассеяния листвой: часть энергии фотонов, первоначально падающих в направлении Ω' и рассеянных от поверхности листа с внешней нормалью Ω_L в телесный угол Ω ; r_{LD} , t_{LD} – соответственно



коэффициенты отражения и пропускания листьев. $\gamma_{LS}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega)$ – зеркальная составляющая отражения, которая выражается через функцию Френеля.

Фрактальная модель дерева

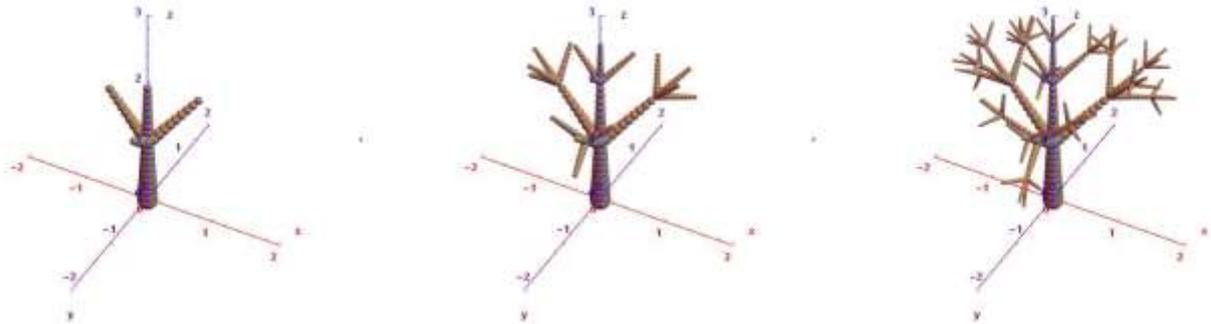


Рис.1. Последовательные этапы построения фрактального дерева.

Для воссоздания пространственной структуры растительного покрова была построена фрактальная модель дерева, основанная на использовании принципа самоподобия (Рис. 1). Модель самоподобного дерева строилась посредством последовательного применения правила ветвления с помощью математического пакета Wolfram Mathematica. На первом шаге в алгоритме задаются координаты дерева, длина ствола и первой ветви, а также и зенитный и азимутальный углы ветвей первого порядка. Для поворота ветвей использовалась функция поворота `RotationMatrix[]`, а длина ветвей дерева предполагалась кратной золотому сечению φ . При построении модельного дерева использовался также масштабный коэффициент, который для первых боковых ветвей был равным φ^{-1} , а для вторых - φ^{-2} , и т.д. Для моделирования ветвления дерева использовалась функция `NestList[f, x, n]`, возвращающая список значений функции f (в нашем случае f – функция поворота и масштабирования ветвей) к заданному аргументу x (x – список заданных параметров) n раз.

Сценарии модельных экспериментов

Для проведения модельного исследования по оценке вклада отражательных свойств почвы на величину интегрального альбедо земной поверхности был выбран модельный участок местности со случайно распределенными модельными листовыми деревьями (Рис. 2). Пространственная структура деревьев была смоделирована с помощью фрактальной геометрии.

В ходе экспериментов были рассмотрены 2 типа растительного покрова с разной густотой, а также 2 типа почв, отличающаяся по величине спектрального отражения (более темная (коэффициент отражения - 1%) и более светлая (20%)). Предполагалось, что поверхность почвы свободна от травянистой растительности и ее отражение изотропно. Средняя величина листового индекса для более плотного растительного покрова составляет $4.0 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а разреженного - $2.0 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Эксперименты

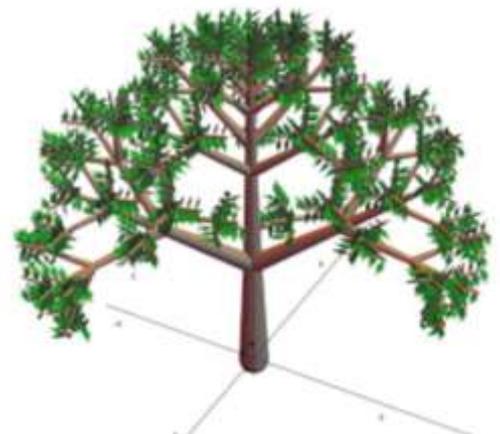


Рис.2. Заполнение веток фрактального дерева листьями



проводились для разных высот солнца над горизонтом, и разного соотношения прямой и рассеянной радиации в падающем потоке. Параллельно с 3D вариантом моделирования растительного покрова был рассмотрен и одномерный (1D) вариант, имитирующий пространственно-однородное распределение фитомассы растительности (аналог однородной мутной среды).

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных численных экспериментов для выбранного модельного участка показали значительную неоднородность поля отраженной и поглощенной солнечной радиации, которая изменялась не только в зависимости от пространственного распределения отдельных деревьев, но также и от высоты солнца над горизонтом, и соотношения в падающем потоке прямой и рассеянной радиации (Рис. 2). При высоте солнца 60° если средняя величина спектрального альbedo участка с густым древостоем составляла около 2.5%, то для идентичного древостоя на светлой почве уже превышала 4.2%. Для разреженного растительного покрова отмечался более значительный вклад почвы в интегральное отражение: если для растительного покрова на темных почвах величина отражения варьировала около 1.5%, то для светлых почв - достигала 8.5%.

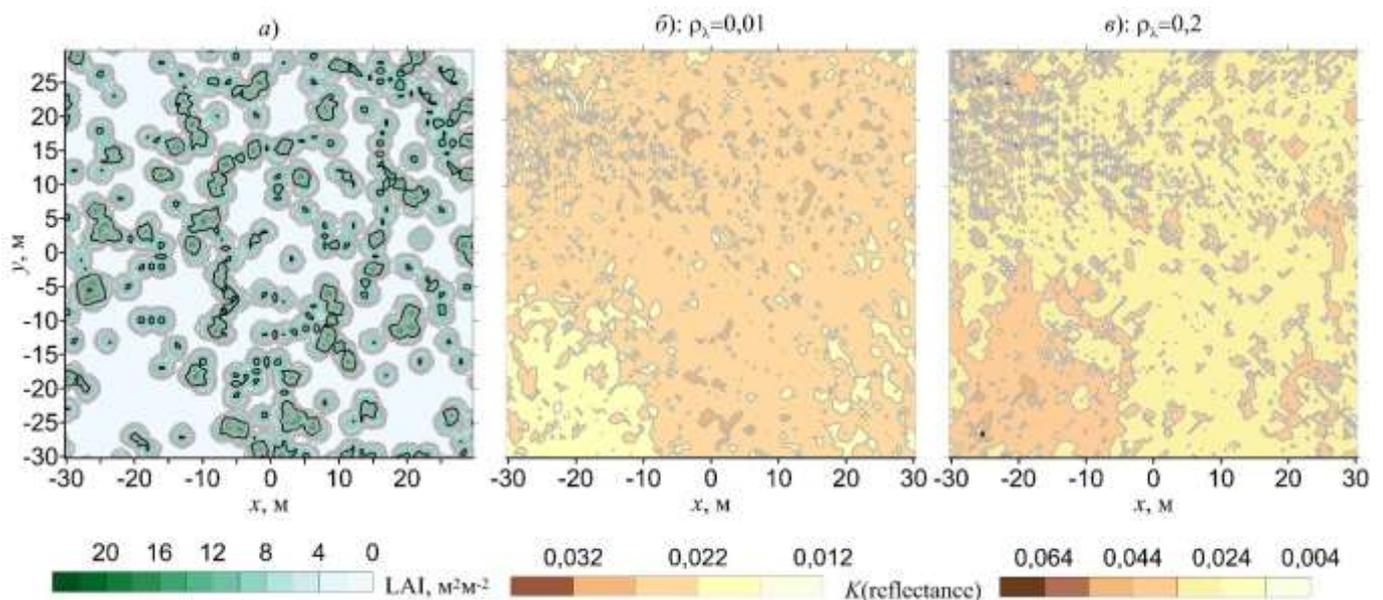


Рис.3. Горизонтальное распределение LAI (а) и альbedo растительного покрова в пределах модельного участка на темной почве с коэффициентом отражения $\rho_\lambda = 0,01$ (б), и на светлой почве, с коэффициентом отражения $\rho_\lambda = 0,2$ (в).

Анализ зависимости спектрального альbedo от высоты солнца для плотного растительного покрова и темной почвы показал общую тенденцию к увеличению альbedo с уменьшением высоты солнца. Данная закономерность связана как с различным вкладом почвы в интегральное отражение, так и большим вкладом обратного рассеяния прямых солнечных лучей, проникающих вглубь растительности при малых высотах солнца.

Сравнение средних значений спектрального альbedo для 3D и 1D модельного сценария показал, что в случае темной почвы использование одномерного модельного подхода приводит к завышенной оценке величины альbedo, в то время как для случая светлой почвы наблюдается обратная тенденция.



Выводы

Результаты проведенного исследования показали существенное влияние отражательной способности почвы на интегральное отражение (альбедо) и поглощение фотосинтетически активной радиации неоднородным растительным покровом, которое изменялось как в зависимости от плотности растительного покрова и ажурности крон, так и от высоты солнца и соотношения прямой и рассеянной радиации в падающем потоке. Было показано, что применение относительно простых одномерных моделей может привести к существенным погрешностям в определении отраженной, рассеянной и поглощенной солнечной радиации. Разработанные модели переноса солнечной радиации и структуры отдельного дерева могут служить эффективными инструментами при расчете характеристик неоднородного растительного покрова, а также использоваться для прогноза первичной продуктивности растительным сообществ, CO_2 и H_2O обмена между земной поверхностью и атмосферой.

Литература

- Knyazikhin Yu., Miessen G., Panferov O., Gravenhorst G. (1997) Small-scale study of three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in a forest. *Agricultural and Forest Meteorol.* **88**, 215–239. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192397000361.
- Levashova N., Lukyanenko D., Mukhartova Y., Olchev A. (2018) Application of a Three-Dimensional Radiative Transfer Model to Retrieve the Species Composition of a Mixed Forest Stand from Canopy Reflected Radiation. *Remote Sensing*, **10** (10), 1661. www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1661.
- Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. (2009). Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature. *Ecological Modelling*, **220**, 3046–3056. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438000900091X
- Ross J., Myneni R.B. (1991). Photon-Vegetation Interactions. Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology. Springer-Verlag Berlin Heidel, 565 p.
- Росс Ю.К. (1975). Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 344 с.



УДК 635.37; 631.436

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ РАЗНОГО ГЕНЕЗИСА

Макарычев С. В.

Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул, РФ, Makarychev1949@mail.ru

Annotation Soil moisture plays a determining role in the formation of the thermo-physical state of soil profiles. The bulk density and dispersity of genetic horizons exert significant influence on the values of thermal capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity, and on their distribution in the soil profile. The influence of moisture on the heat transfer coefficients is actively manifested in sandy loams, somewhat weaker in loamy soils and very weakly in clayey soils. At the same time, the hierarchy of soil structural organization levels is maintained. The knowledge of interrelations of thermal coefficients and soil-physical factors enabled to develop the structural and functional concept of soil thermo-physical condition.

Введение

Теплофизические показатели почвы, такие как теплоемкость, тепло- и температуропроводность в первую очередь зависят от плотности сложения, степени увлажнения и дисперсности ее генетических горизонтов.

Известно, что увлажнение почвы играет определяющую роль в формировании теплофизического состояния почвенных профилей [1-5]. При этом объемная теплоемкость линейно растет при увеличении влажности, температуропроводность имеет ярко выраженный максимум, а теплопроводность почв нелинейно увеличивается, стремясь к "насыщению».

Значительное влияние на величину теплофизических коэффициентов и их распределение в почвенном профиле оказывает плотность сложения и дисперсность генетических горизонтов.

Тем не менее, целостная картина, увязывающая теплофизические характеристики почвы и почвенно-физические показатели требует определенной доработки.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования явились почвы разного генезиса. Для измерения теплофизических характеристик в лабораторных условиях был использован импульсный метод плоского источника тепла. В поле применялся цилиндрический зонд [6, 7].

Результаты исследований

Знание взаимосвязей комплекса термических и почвенно-физических факторов позволило разработать структурно-функциональную концепцию теплофизического состояния почв.

Действительно, теплофизические показатели генетических горизонтов почвенного профиля суть структурно-функциональные, именно тот или иной характер построения агрегатно-структурного уровня организации почвы из элементарных почвенных частиц предопределяет их величину и степень изменчивости не только отдельно взятого горизонта (горизонтного структурного уровня), но и всего почвенного профиля в целом (уровня почвенного индивидуума). Таким образом, здесь выдерживается иерархия уровней структурной организации почвы [2].



Структурно-функциональная концепция базируется на установленной зависимости экстремального значения температуропроводности (α) и критического значения теплопроводности (λ) на кривой, отображающей функции $\alpha = f(U)$ и $\lambda = f(U)$.

Установлено, что максимум температуропроводности суглинистых почв наблюдается при влажности, близкой к ВРК, которая характеризуется переходом пленочно-стыковой влаги в пленочно-капиллярную.

Потенциал влаги в этом состоянии назван А. Д. Ворониным [2] потенциалом при максимальной молекулярной влагоемкости почвы (ММВ). При этом потенциале поверхностные силы в изотермических условиях удерживают максимальное количество пленочной влаги. Таким образом, здесь осуществляется термодинамическое равновесие между пленочной и капиллярной влагой, определяемое структурой почвенного тела, когда возникает не только состояние разрыва капиллярной связи в почве, но и состояние восстановления диффузионной связи в ее поровом пространстве.

В супесчаных почвах максимум температуропроводности и критическое значение теплопроводности приурочены к НВ. В этом состоянии почвенная влага приобретает свойство капиллярно-связного водного тела, обеспечивающего достаточно высокие значения контактной тепло- и температуропроводности, в то время как оставшиеся свободными воздушные поры поддерживают значительную термопаропередачу.

В глинистых почвах, где преобладают мелкие поры, максимум температуропроводности смещен в сторону влажности завядания. При такой степени почвенного увлажнения доля капиллярно-подвешенной влаги ничтожна и практически вся она представлена рыхлосвязанной формой, находящейся и ней в неустойчивом термодинамическом равновесии.

Так, при уплотнении, сопровождающемся разрушением крупных пор, наблюдается переход влаги в более мелкие поры, где критический потенциал $\psi_{\text{ММВ}}$ наступает при меньшей влажности, поэтому часть почвенной влаги переходит в категорию капиллярно-подвешенной, капиллярно-подпертой или гравитационной (в зависимости от механического состава). При этом разрушается воздушно-связное состояние парового пространства и, как следствие, уменьшается температуропроводность. Для восстановления равновесия часть почвенной влаги необходимо удалить. Нами получены зависимости влажности, соответствующие максимуму температуропроводности $U_{\alpha_m} = f(\gamma)$ для почв глинистого (1), суглинистого (2) и супесчаного (3) гранулометрического состава. В соответствии с ними получены уравнения линейной регрессии:

$$U_{\alpha_m(1)} = 42,3 - 0,017\gamma; \quad U_{\alpha_m(2)} = 37,9 - 0,017\gamma; \quad U_{\alpha_m(3)} = 34,7 - 0,017\gamma$$

где U – влажность почвы, % от массы; γ – плотность почвы, кг/м³.

Коэффициент корреляции 0,83 при однопроцентном уровне значимости. Уравнения для глинистых и суглинистых почв справедливы в пределах (900 - 1600) кг/м³, для супесчаных - (1300 - 1700) кг/м³. Взаимосвязь структуры (механических элементов) и теплофизических показателей отражает уравнение: $U_{\alpha_m} = - 8,9 + 7,2 \ln D$

При этом индекс детерминации криволинейной корреляции оказывается равным 0,92 при однопроцентном уровне значимости, т.е. на 92 % максимальная температуропроводность обеспечена дисперсностью почвы. В табл. 1 приведены данные зависимости скорости изменения влажности dU_m/dD , при которой отмечается экстремальное значение температуропроводности от степени дисперсности почвы.



Наибольшая скорость изменения влажности, соответствующая максимуму температуропроводности, отмечается в супесчаных почвах. Несколько меньше она в суглинистых почвах, а в глинистых очень сильно снижается и стремится к нулю.

Таблица 1 Скорость изменения влажности dU_m/dD в зависимости от степени дисперсности

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Глинистая фракция, % | 15,0 | 25,0 | 37,0 | 52,5 | 67,5 | 80,0 | 92,5 |
| dU_m/dD | 1,60 | 0,90 | 0,51 | 0,32 | 0,18 | 0,12 | 0,09 |

В то же время влажность, соответствующая максимуму температуропроводности в зависимости от дисперсности имеет криволинейную зависимость, стремящуюся к «насыщению» (табл. 2).

Таблица 2 Зависимость влажности, соответствующей a_m , от степени дисперсности почвы

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Глинистая фракция, % | 15,0 | 25,0 | 37,0 | 52,5 | 67,5 | 80,0 | 92,5 |
| U_{a_m} | 8,1 | 12,3 | 17,4 | 18,6 | 20,1 | 22,1 | 23,2 |

Из анализа табл. 1 и 2 следует, что воздействие влаги на коэффициенты теплопередачи наиболее активно проявляется в супесчаных почвах. Слабее оно в суглинистых и очень слабо в глинистых почвах. В то же время энергия связи влаги с твердой фазой почвы наоборот выше в более дисперсных средах. Именно поэтому динамичность коэффициентов тепло- и температуропроводности снижается при переходе от супесчаного к глинистому гранулометрическому составу. В связи с тем, что в зависимости от степени влагосодержания меняется энергия связи влаги с твердым почвенным скелетом можно заключить, что в различных диапазонах увлажнения преобладает определенный, в зависимости от гранулометрического состава, механизм влияния влаги и на теплоемкость почвы. В этом заложена одна из основ структурно-функциональной (энергетической) концепции теплофизического состояния почвы. Таким образом, структурно-функциональная концепция теплофизического состояния увязывает количественные соотношения между основными почвенно-физическими факторами (U , D и γ) и теплофизическими показателями (a_m , λ_k) почвы.

Выводы

1. Почвенно-физические факторы оказывают неоднозначное влияние на характер и величину теплофизических характеристик почв разного генезиса. Наиболее существенную роль играет при этом степень почвенного увлажнения, плотность сложения и степень дисперсности.

2. Скорость изменения коэффициентов тепло- и температуропроводности снижается при переходе от супесчаного к глинистому гранулометрическому составу. В связи с тем, что в зависимости от степени влагосодержания меняется энергия связи влаги с твердым почвенным скелетом можно заключить, что в различных диапазонах увлажнения преобладает определенный, в зависимости от гранулометрического состава, механизм влияния влаги и на теплоемкость почвы. В этом заложена одна из основ структурно-функциональной (энергетической) концепции теплофизического состояния почвы. Таким образом, структурно-функциональная концепция теплофизического состояния увязывает



количественные соотношения между основными почвенно-физическими факторами (U , D и γ) и термическими показателями (a_m , λ_k) почвы.

Литература

1. Воронин А.Д. Основы физики почв: учеб. пособие. - М.: Изд-во МГУ, 1986. - 244 с.
2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М: Изд-во МГУ, 1984. – 203 с.
3. Pinich V.V., Bolotov A.G., Shein E.V., Makarychev S.V. Assessment of surface moisture in the catchment area on the base of modelling the hydrological properties of soils // 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo, 1-6 July 2018, vol. 3, pp. 931-935.
4. Bolotov A.G., Shein E.V., Makarychev S.V. Water retention capacity of soils in the Altai Region // Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52. – No. 2. – pp. 187–192.
5. Simsek U., Shein E.V., Mikailsoy F., Bolotov A.G., Erdel E. Subsoil Compaction: The Intensity of Manifestation in Silty Clayey Calcic Pantofluvic Fluvisols of the Iğdır Region (Eastern Turkey) // Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52. – No. 3. – pp. 296–299.
6. Макарычев С.В. Теплофизические свойства почв Юго-Западной Сибири. Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора биол. наук. М: МГУ, 1993. – 32 с.
7. Болотов А.Г. Определение теплофизических свойств почв с использованием систем измерения ZETLab // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 12. – С. 48-50.



УДК 631.4

ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ

Решоткин О.В., Худяков О.И.

ИФХиБПП РАН, Пушкино, Российская Федерация

reshotkin@rambler.ru

SOIL TEMPERATURE INCREASE OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA FOR THE PAST 50 YEARS

Reshotkin O.V., Khudyakov O.I.

IPBPSS RAS, Pushchino, Russian Federation

Annotation: The study of the spatial and temporal dynamics of soil temperature and other climate parameters of the European part of Russia in relation to modern climate change has been conducted. The trends of changes in soil temperature at different depths over a 50-year period are revealed. It is established that the modern period is characterized by soil warming and a decrease in the depth of seasonal soil freezing.

Введение

Глобальное потепление в последние десятилетия широко обсуждается в научных и общественно-политических кругах. Большинство сценариев изменения климата основано на анализе температуры воздуха. Однако для многих теоретических и прикладных задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата, первостепенное значение имеет температура почвы – важнейшая характеристика климатических, почвообразовательных и инженерно-геологических условий.

Температура почвы играет важную роль во всех физических, химических и биологических процессах, происходящих в почве. Она регулирует прорастание семян растений, появление всходов, угнетает или усиливает рост корней. Изменение температуры может повлиять на большинство почвенных процессов, включая разложение и образование органического вещества в почве, минерализацию и иммобилизацию питательных веществ, нитрификацию и денитрификацию азота, выделение углекислого газа из почвы.

Работы последних лет показывают существование тенденции к увеличению температуры почвы в разных частях земного шара (Zhang Y. et al., 2005; Zhang H. et al., 2016; Knight et al., 2018). Климат России более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат многих других регионов Земли (Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014). Настоящая работа посвящена исследованию пространственно-временной динамики температуры почв европейской части России в связи с современным изменением климата.

Объекты и методы

Для анализа изменений температуры почвы нами использованы данные наблюдений на глубинах от 20 до 320 см на метеостанциях Росгидромета. Кроме того, были проанализированы температура воздуха и количество осадков с целью выявления тенденций их изменения, а также их взаимосвязи с температурой почвы.

Объектами исследования являются почвы различных природных зон европейской части России: тундровый торфяно-подзол глеевый иллювиально-гумусовый супесчаный зоны притундровых лесов, светло-серая лесная супесчаная почва подтаежной зоны и чернозем предкавказский суглинистый степной зоны.



Климатические условия формирования почв характеризуются данными наблюдений на метеостанциях Мезень, Архангельская область (65°52' с.ш., 44°13' в.д., высота – 14 м), Елатьма, Рязанская область (54°58' с.ш., 41°45' в.д., высота – 132 м) и Гигант, Ростовская область (46°31' с.ш., 41°21' в.д., высота – 79 м), расположенных соответственно на севере, в центре и на юге Восточно-Европейской равнины.

Динамика температуры воздуха, почвы и осадков в многолетнем и сезонном циклах проанализирована относительно климатической нормы (КН) – средней величины параметров климата за период 1961-1990 гг., которая рассматривается как количественная характеристика условий почвообразования и изменчивости климата во времени.

Результаты и обсуждение

Среднегодовая температура воздуха за период 1961-1990 гг. (КН) в зоне притундровых лесов отрицательная и составляет по данным метеостанции Мезень -0.8°C . В подтаежной и степной зонах она положительная и составляет по данным метеостанций Елатьма и Гигант соответственно 4.3 и 9.8°C . Динамика температуры воздуха имеет колебательный характер с чередованием периодов похолодания и потепления при общей тенденции повышения температуры. Так в Елатьме за 133 года метеорологических наблюдений (1886-2018 гг.) среднегодовая температура воздуха увеличилась на 2.0°C . За последние 50 лет (1969-2018 гг.) температура воздуха увеличилась в Мезени на 2.4°C , в Елатьме на 2.1°C , а в Гиганте на 2.2°C .

Начиная с 1970-х гг. в Мезени и Елатьме наблюдается увеличение среднедесятилетней среднегодовой температуры воздуха каждое последующее десятилетие. С 1980-х гг. среднедесятилетняя среднегодовая температура воздуха стала превышать КН и достигла своих максимальных значений в 2011-2018 гг. В Мезени температура воздуха стала положительной. В Гиганте рост среднедесятилетней среднегодовой температуры воздуха начался на десятилетие позднее и в текущее десятилетие он остановился, среднегодовая температура воздуха находится на уровне 2001-2010 гг. В Мезени наиболее интенсивный рост температуры воздуха наблюдается в последние 20 лет. За этот период температура воздуха увеличилась на 2.0°C , в то время как в Елатьме и Гиганте за аналогичный период температура выросла всего на 0.6°C .

Начало XXI века стало самым теплым за весь период наблюдений. Среднегодовая температуры воздуха за период 2001-2018 гг. превысила климатическую норму в Мезени на 1.5°C , а в Елатьме и Гиганте на 1.3°C . При этом в разные сезоны года температура увеличилась неодинаково. Наибольшее повышение температуры воздуха в Мезени и Елатьме наблюдается в зимний сезон, а в Гиганте в летний сезон.

Сумма отрицательных температур воздуха изменяется от -1856°C в Мезени до -1115°C в Елатьме и -411°C в Гиганте. Сумма положительных температур воздуха изменяется от 1544°C в Мезени до 2699°C в Елатьме и 4011°C в Гиганте. За период 2001-2018 гг. сумма отрицательных температур уменьшилась относительно КН в направлении с севера на юг на 338°C в Мезени, на 237°C в Елатьме и на 105°C в Гиганте. Сумма положительных температур за аналогичный период увеличилась в Мезени на 245°C , в Елатьме на 257°C , а в Гиганте на 371°C . Продолжительность периода с отрицательной температурой воздуха уменьшилась в Мезени на 18 дней, в Елатьме на 14 дней, а в Гиганте на 15 дней.

Сумма активных температур воздуха выше 10°C изменяется от 1007°C в Мезени до 2282°C в Елатьме и 3555°C в Гиганте. За период 2001-2018 гг. сумма активных температур воздуха увеличилась относительно КН в Мезени на 221°C , в Елатьме на 265°C , а в Гиганте на 312°C . Продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C увеличилась в Мезени на 14 дней, в Елатьме на 12 дней, а в Гиганте на 6 дней.



Увеличение суммы температур выше 0°C и суммы активных температур выше 10°C и уменьшение суммы температур ниже 0°C свидетельствует об увеличении в начале XXI века обеспеченности теплом европейской части России и уменьшении запасов холода.

Годовое количество осадков (КН) в Мезени составляет 497 мм, в Елатье 621 мм, а в Гиганте 505 мм. В Мезени и Елатье повышение температуры воздуха сопровождается увеличением осадков. За последние 50 лет в Мезени годовое количество осадков увеличилось на 122 мм, а в Елатье на 68 мм. В Гиганте, напротив, повышение температуры воздуха сопровождается уменьшением осадков, что особенно заметно в два последние десятилетия. За последние 50 лет годовое количество осадков уменьшилось на 20 мм, а за последние 20 лет на 91 мм.

Увеличение осадков происходило неодинаково в теплый и холодный периоды года и в разные сезоны. В Мезени основное увеличение осадков приходится на теплый период года и особенно летний сезон. В Елатье в теплый и холодный периоды года осадки увеличились одинаково. Больше всего осадки увеличились в зимний сезон, а в осенний сезон они несколько уменьшились. В Гиганте в теплый период года, в летний сезон наблюдается уменьшение осадков, а в холодный период увеличение осадков.

Среднегодовая температура почвы (КН) в Мезени составляет 3.0°C на глубинах 20 и 80 см, 2.9°C на 160 см и 2.7°C на 320 см. В Елатье среднегодовая температура почвы на глубине 40 см составляет 6.9°C , а на всех остальных глубинах 7.0°C . В Гиганте среднегодовая температура почвы составляет 11.5°C на глубинах 20, 40 и 80 см, 11.6°C на 160 см и 11.7°C на 320 см.

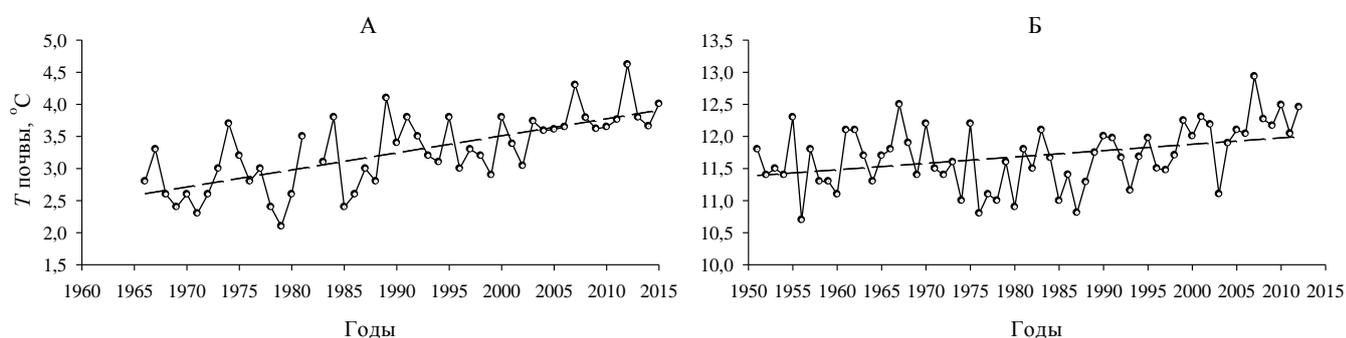


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры почвы на глубине 160 см. А – тундровый торфяно-подзол глеевый иллювиально-гумусовый (Мезень), Б – чернозем предкавказский (Гигант). Пунктирной линией показана линейная регрессия

Анализ динамики среднегодовой температуры почвы показывает хорошо выраженную тенденцию ее увеличения (рис. 1). За последние 50 лет среднегодовая температура увеличилась во всех исследованных почвах и на всех глубинах. Так, например, в черноземе предкавказском за 50-летний период на глубине 20 см температура увеличилась на 1.2°C , на 40 и 80 см – на 0.8°C , на 160 см – на 0.7°C , а на 320 см – на 0.5°C . Эти данные показывают, что с глубиной тепловая волна постепенно затухает. Тем не менее, потепление отмечается и на больших глубинах 160 и 320 см, что свидетельствует о его интенсивности. В тундровом торфяно-подзоле среднегодовая температура почвы увеличилась более значительно и более равномерно на всех глубинах. На глубине 20 см она увеличилась на 1.4°C , на 160 см – на 1.3°C , а на 320 см – на 1.6°C .

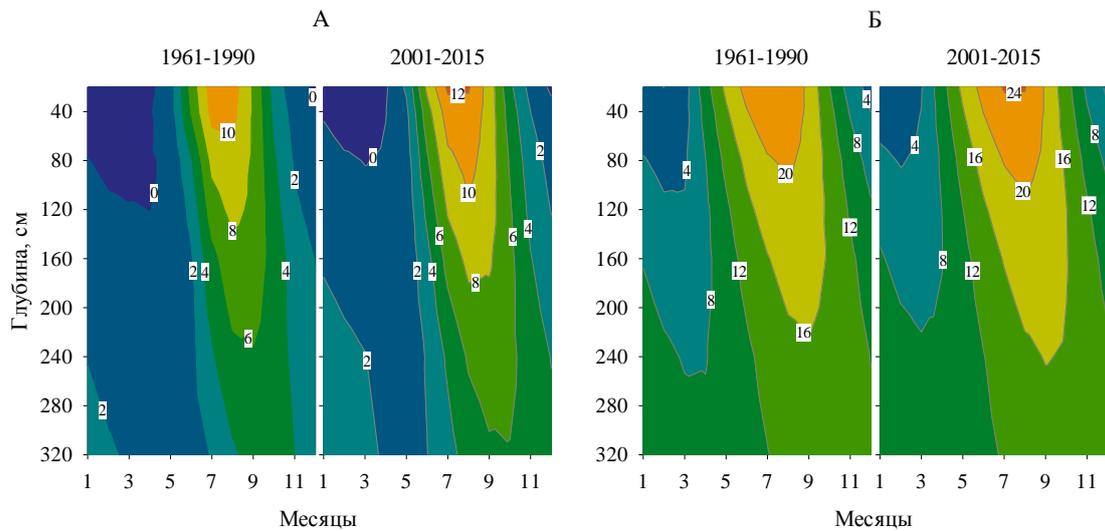


Рис. 2. Температура почвы (средняя за период 2001-2015 гг.) относительно климатической нормы (1961-1990 гг.). А – тундровый торфяно-подзол глеевый иллювиально-гумусовый (Мезень), Б – чернозем предкавказский (Гигант)

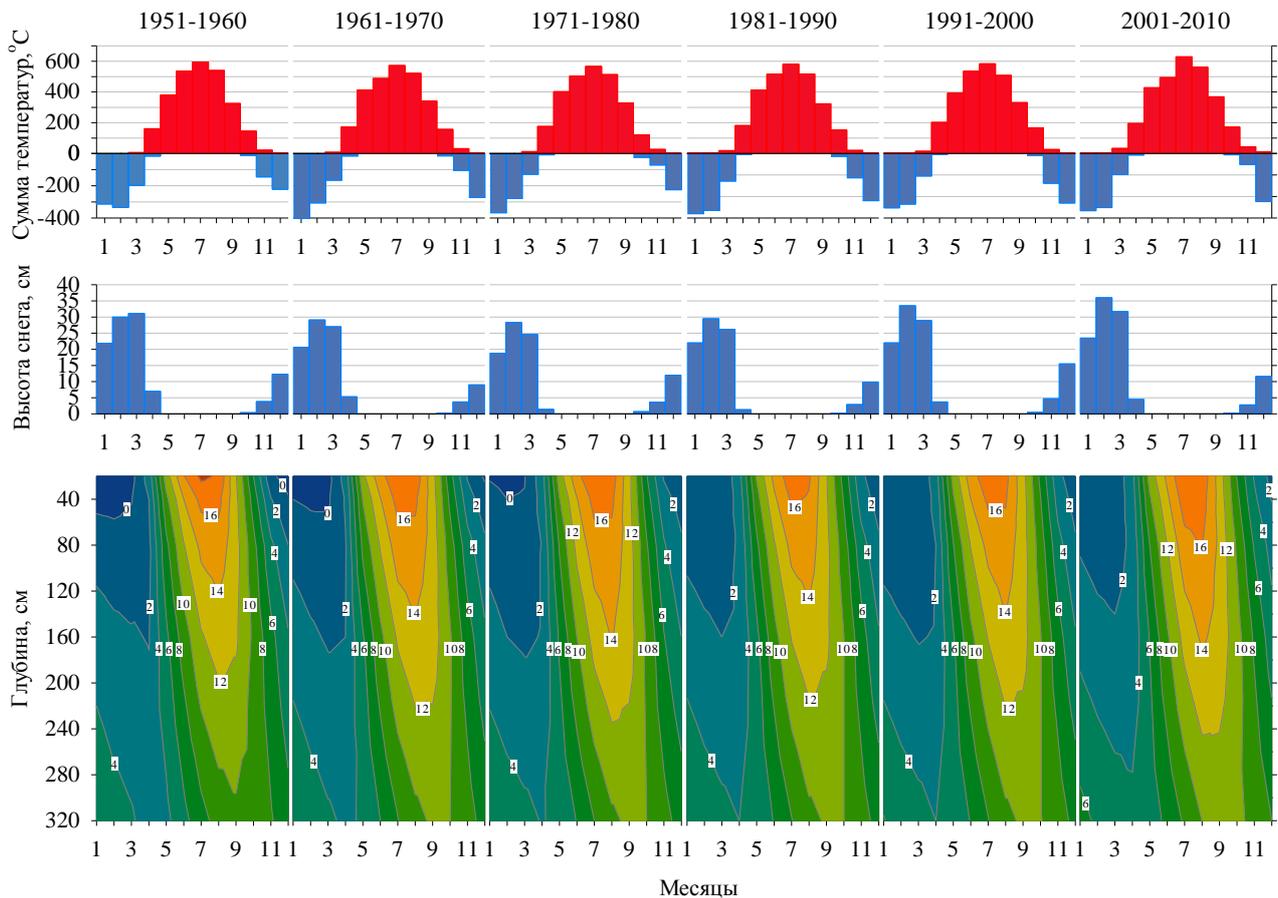


Рис. 3. Динамика температуры почвы, высоты снега и суммы положительных и отрицательных температур воздуха. Почва – светло-серая лесная (Елатьма)

Сумма температур почвы выше 0°C на глубине 20 см (КН) составляет 1277°C в Мезени, 2640°C в Елатьме и 4288°C в Гиганте. За период 2001-2015 гг. она увеличилась в Мезени на 267°C , в Елатьме на 253°C и в Гиганте на 274°C , что свидетельствует об увеличении количества тепла в почвах. Сумма температур почвы ниже 0°C на глубине 20 см в Мезени



составляет -165°C , в Елатье -43°C и в Гиганте -35°C . За период 2001-2015 гг. она, наоборот уменьшилась на 34°C в Мезени и Елатье и на 20°C в Гиганте, что, в свою очередь, свидетельствует об уменьшении количества холода в почвах.

Сумма активных температур почвы выше 10°C на глубине 20 см составляет 583°C в Мезени, 2142°C в Елатье и 3807°C в Гиганте. За период 2001-2015 гг. она увеличилась в Мезени на 250°C , в Елатье на 176°C и в Гиганте на 163°C . Температура выше 10°C в Мезени проникает в почву в среднем на глубину 61 см (КН). В 2001-2015 гг. глубина проникновения в почву геоизотермы 10°C увеличилась относительно КН на 47 см (рис. 2). В Елатье в 1950-е гг. глубина проникновения геоизотермы 10°C составила 295 см (рис. 3). В последующие десятилетия она увеличилась, температуры выше 10°C стали проникать в почву на глубину ниже 320 см, увеличилась мощность почвенной толщи с активными температурами.

На рис. 3 на примере светло-серых лесных почв подтаежной зоны показана динамика температуры почвы за последние шесть десятилетий начиная с 1950-х годов. Как видно из рисунка, глубина проникновения в почву нулевой геоизотермы первые три десятилетия последовательно уменьшалась и начиная с 1980-х гг. геоизотерма 0°C на глубине 20 см и ниже в почве не наблюдается. Это свидетельствует о существенном уменьшении глубины промерзания светло-серых лесных почв за исследуемый период. В Мезени в 2001-2015 гг. глубина проникновения температуры 0°C уменьшилась по сравнению с КН (122 см) на 38 см. В Гиганте КН глубины проникновения температуры 0°C в почву составляет 21 см. В 2001-2015 гг. геоизотерма 0°C на глубине 20 см и ниже в почве не наблюдается.

Современное потепление находит свое отражение в почвах зонального ряда. В лесотундре оно сопровождается расширением ареала распространения древесной растительности в зону тундры, что при длительном воздействии может привести к формированию в почвах элювиального горизонта. В степных и лесостепных почвах потепление сопровождается формированием почвенных засух.

Выводы

В современный период в европейской части России наблюдается потепление почв по всему их профилю, которое отмечается как в теплый, так и в холодный периоды года и характеризуется увеличением среднегодовой и среднемесячной температуры почв, увеличением суммы положительных и активных температур в почвах в вегетационный сезон, уменьшением глубины сезонного промерзания и длительности нахождения почв в мерзлом состоянии.

Благодарности

Работа выполнена по теме Государственного задания № 0191-2019-0046.

Литература

- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Zhang Y. et al. (2005) Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to atmospheric climate change. *Journal of Geophysical Research* **110**, D03112. doi:10.1029/2004JD004910.
- Zhang H. et al. (2016) Rising soil temperature in China and its potential ecological impact. *Scientific Reports* **6**, 35530. doi: 10.1038/srep35530.
- Knight J.H. et al. (2018) Soil temperature increase in eastern Australia for the past 50 years. *Geoderma* **313**, 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.015>.



УДК 551.583: 551.578.42

УЧЁТ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПРОСТОЙ СТЕФАНОВСКОЙ МОДЕЛИ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА

Фролов Д.М.

Географический факультет МГУ, Москва, Российская Федерация

Denisfrolov@mail.ru

TAKING INTO ACCOUNT OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF SNOW COVER IN SIMPLEST STEPHAN GROUND FREEZING MODEL

Denis M. Frolov

Lomonosov Moscow State University

Annotation: For determination of snow cover effect in relation of air and ground temperature alteration under circumstances of overall climate change and its interannual variations the simplest Stephan model of ground freezing with taking into account of structure and properties of snow was considered. The calculation for Narayan-Mar has shown a good agreement with measured data.

Введение

В связи с изменением климата в последние десятилетия, по крайней мере, в Арктике повышение температуры грунта и увеличение толщины сезонно-талого слоя не может быть объяснено только увеличением температуры воздуха - также существенный вклад вносит изменение толщины снежного покрова. Суммарный эффект от изменения температуры и толщины снежного покрова может составлять несколько градусов ($2-3^{\circ}\text{C}$). Это несущественно для устойчивости мерзлых грунтов с температурой $-8 - -10^{\circ}\text{C}$, но для мерзлоты с температурой $-3 - -5^{\circ}\text{C}$ и выше это может вести к оттаиванию, увеличению сезонно-талого слоя и неустойчивости зданий и линейных сооружений.

Кроме того, на практике средняя глубина промерзания и заложения подземных линейных коммуникаций определяются по известным данным о среднем многолетнем режиме накопления снежного покрова и сезонного хода температуры для конкретного региона. Изменения же в процессе внутри сезонного накопления снежной толщи и изменения температуры по отношению к средним значениям ведут к отклонениям в изменении температуры грунта, экстремальным отклонениям значений глубины промерзания. Это также является опасностью для заложенных линейных сооружений.

Для изучения этих явления предлагаются различные расчетные схемы оценки глубины промерзания грунта на основе климатических и метеорологических данных. В.А. Кудрявцев (Кудрявцев, 1954) охарактеризовал отепляющее и охлаждающее действие снежного покрова на грунт в зависимости от режима снегонакопления и продолжительности его залегания и предложил уравнение для оценки глубины промерзания, включающее высоту снежного покрова, теплофизические свойства снега и амплитуду годовых колебаний температуры воздуха.

В нашем случае расчетная схема была построена на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом (Рис. 1). Уравнение теплового баланса включает энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт, снежный покров и атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что



температура в каждой из сред изменяется линейно. Для снежного покрова и мерзлого и талого грунта использовалась формула теплопроводности трехслойной среды.

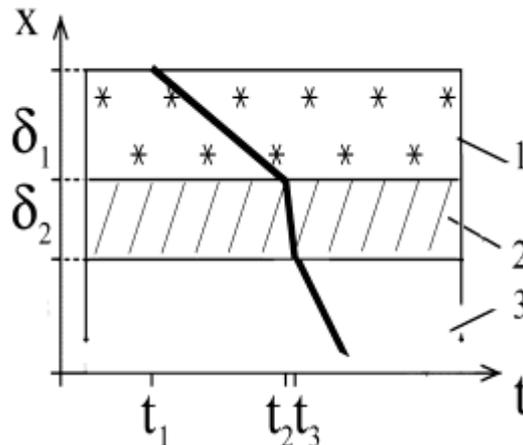


Рис.1. Распределение температуры в среде, состоящей из снежной толщи (1), слоя мерзлого (2) и слоя талого грунта (3)

Однако также предполагалось, что снежный покров состоит из различных слоёв, отложенных во время различных снегопадов. Что плотность, и соответственно теплопроводность каждого слоя определяется отношением водозапаса к его толщине. Таким образом, учет метеоданных о температуре воздуха, осадках и толщине снежного покрова, а также выпадения и интенсивности снегопадов на ближайшей метеостанции позволяют определить водозапас и плотность каждого слоя и построить обобщённый региональный стратиграфический разрез снежной толщи (Рис. 2, а), подобно (Голубев и др., 2009; Фролов, Голубев, 2013; Golubev et al., 2017). При этом возникает возможность определить теплопроводность снежного покрова и произвести расчет интенсивности промерзания грунта более точно.

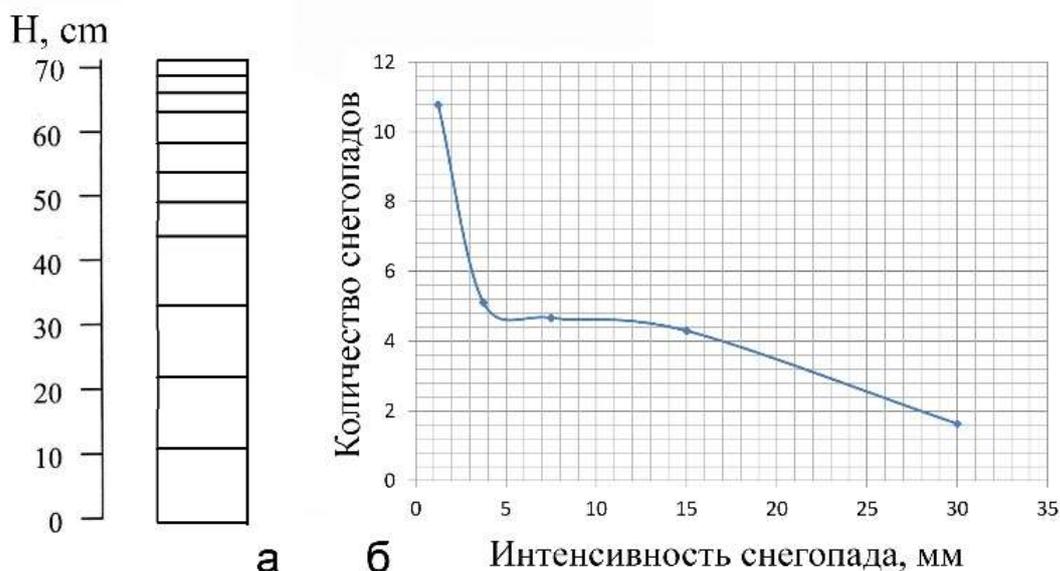




Рис.2. (а) - обобщённый стратиграфический разрез снежной толщи на метеостанции Нарьян-Мар для 1988-2008 гг. (б) - среднее число снегопадов заданной интенсивности согласно данным метеостанции Нарьян-Мар 1988-2008 гг.

Объекты и методы и результаты и обсуждение

На основе метеоданных (Специализированные массивы...) о температуре воздуха, осадках и толщине снежного покрова выделены сведения о выпадении и интенсивности снегопадов на ближайшей метеостанции Нарьян-Мар. Построены обобщенные стратиграфические разрезы для этого региона за зимние сезоны 1990/91-2015/16 подобно (Голубев и др., 2009; Фролов, Голубев, 2013; Golubev et. al., 2017), (Рис. 2, а, б). На основе зависимости теплопроводности снега λ_c от плотности по формуле А.В. Павлова (Павлов, 1979) проводилась оценка теплопроводности отдельных слоёв снега. А согласно формуле теплопроводности многослойной среды на основе информации о слоях:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{1}{\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} + \dots + \frac{\lambda_n}{\Delta x_n}}$$

определялась теплопроводность всей снежной толщи. Расчет промерзания грунта, покрытого снегом в зимний период, на основе данных о ежедневно температуре воздуха и толщине и теплопроводности снежного покрова позволяет оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находится по расчетной схеме. Схема учитывает намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта, покрытого снегом в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха и толщине снежного покрова. Уравнение теплового баланса записывалось как $F_1 = cLV + F_2$, где:

F_1 - отток тепла через снежный покров и замёрзший грунт от фронта промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

cLV - расход тепла на фазовый переход, с влагосодержание грунта ($1-4 \text{ кг}/\text{см}^3 \cdot \text{м}^2$), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ и коэффициентом пористости $0,617$ (Грунтоведение, 2005))

L - энергия фазового перехода ($335 \text{ кДж}/\text{кг}$), V - скорость движения фронта промерзания ($\text{см}/\text{с}$);

F_2 – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Тепловой поток выражался по закону Фурье через градиент температуры и теплопроводность как $F = \lambda (\text{grad } T)$, а теплопроводность и тепловой поток через комбинацию из двух сред (снег и мерзлый грунт) согласно данным справочника (Михеев, 1977) может быть выражена как:

$$F_1 = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}} = \frac{T_{\text{возд}}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{l_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}}$$

Здесь $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха, h_c и $l_{\text{мг}}$ – толщина снега и глубина промерзания, а λ_c и $\lambda_{\text{мг}}$ – теплопроводность снега и мёрзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со значением около 7°C . Поэтому

$$F_2 = \lambda_{\text{мг}} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{\text{мг}} \frac{T_0}{10 - l_{\text{мг}}}$$



Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $l_{\text{мг}}$ равна 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $l_{\text{мг}}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно (Грунтоведение, 2005), средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта может быть взята как 1,5 и 1,8 Вт/м°C. Получено хорошее согласование расчетной и наблюдаемой глубины промерзания для рассматриваемого временного интервала на рассматриваемой метеостанции.

Благодарность

Работа осуществлена при поддержке темы госзадания ГЗ АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов».

Литература

- Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. (2009) Межгодовые вариации строения снежного покрова на территории России. *Вестник Московского университета. Серия 5: География.* № 3. С. 16–25.
- Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. — М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005
- Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР / М.: Изд-во АН СССР, 1954. 183 с.
- Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М., Энергия, 1977, 344 с.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, «Наука», 1979. 284 с.
- Специализированные массивы климатических исследований <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>
- Фролов Д.М., Голубев В.Н. Изменение климатических показателей и толщины снежного покрова на территории России в конце XX – начале XXI вв. и их влияние на глубину промерзания грунта. *Экология северных территорий. Материалы Международного Конгресса (Всемирный форум снега). Новосибирский Экспоцентр.* 2013. С. 148–152.
- Golubev V. N., Petrushina M. N., Frolov D. M. (2017) Snowfall events as a factor of snow cover's stratigraphy formation. *Proceedings of the 2nd Int. Electron. Conf. Atmos. Sci., 16–31 July 2017.* — Vol. 2 of Sciforum Electronic Conference Series. DOI: 10.3390/ecas2017-04135



УДК 631.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОЧВ ХИБИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЧЕСКИХ ТЕРМОХРОНОВ

Штабровская И.М.¹, Зенкова И.В.²

^{1,2} Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ «Кольский научный центр РАН»,
Апатиты, Мурманская область; e-mail: ishtabrovskaya@mail.ru, zenkova@inep.ksc.ru

STUDY OF THE TEMPERATURE OF MOUNTAIN SOILS OF Khibiny WITH THE USE OF AUTOMATIC
THERMOCHRONES

Shtabrovskaya I.M.¹, Zenkova I.V.²

^{1,2} Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center RAS, Apatity, Murmansk Region; e-mail: ishtabrovskaya@mail.ru, zenkova@inep.ksc.ru

Annotation: The nature of the temperature distribution in the outer layer is also an indicator that temperature affects the rate of biological, physicochemical, and biochemical processes in the soil, determines the growth and development of living organisms and their vital activity, and ultimately leads to an increase and improvement soil biota, i.e. soil biodiversity. The greatest fluctuations in temperature are observed in the surface layer of the soil - the organic horizon or litter, the most populated biota. In recent years, studies have been carried out on the temperature regime of mountain soils in the Murmansk region using autonomous programmable “automatic tablet” of the new generation.

Введение

Актуальность исследования температурного режима горных почв объясняется:

1 – специфическими особенностями горного микроклимата, который не только определяет особенности развития и функционирования горных почв и своеобразие их растительных, животных и микробных сообществ, но и оказывает влияние на климат предгорных ландшафтов;

2 – оказывает влияние на скорость протекания биологических, физико-химических, биохимических процессах в почвах, обуславливает рост и развитие живых организмов и активность их процессов жизнедеятельности, и, в конечном итоге, определяет разнообразие почвенной биоты.

3 – индикаторной ролью температурного режима горных территорий в комплексном мониторинге климатических изменений в глобальном и региональном масштабах.

Изучения температуры горных почв Мурманской области ранее были выполнены на почвах: Государственного природного заповедника «Пасвик» (Карпова, 2013; Зенкова, 2013) и разных высотных поясов Хибинского массива (Шмакова и др., 2008; Зенкова, 2015). Этими авторами было показано, что в горных условиях температурная динамика подстилок сопряжена с изменением температуры более прогретого атмосферного воздуха и зависит от факторов высотной поясности и экспозиции склонов. Подобные исследования температуры органогенных горизонтов в высотном градиенте гор ведутся на Приполярном Урале сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН (Старцев и др., 2017). Как и в наших исследованиях, в работе почвоведов из Коми НЦ используются измерительные приборы нового поколения - автономные программируемые термохроны.

В докладе представлены результаты исследований, полученные в экосистемах Хибин в полевые сезоны 2013 - 2018 годов.



Объекты и методы

Хибинский массив расположен на северо-западе европейской части России - в Мурманской области, которая географически охватывает территорию Кольского п-ова и часть материка. Площадь Хибин оценивается в 1300 км², что составляет 0.89% от общей площади Мурманской области, равной 144.9 тыс. км² (Атлас Мурманской области, 1971).

За указанный пятилетний период исследования температурных показателей горных почв проведены на 23 участках с разной экспозицией в основных горно-растительных поясах Хибин: горно-таежном, поясе березовых криволесий, горно-тундровом и гольцовом поясе на горных плато (табл. 1).

На каждом участке в подстилку на глубину 5 см закладывали термохроны серии ТРВ-2 с предельным диапазоном измерений от -25 до +40 °С. Термохроны предварительно программировали на измерение температуры с периодичностью 2 часа (внутрисуточная динамика). По 12 измерениям за каждые сутки рассчитывали среднесуточные значения $T_{сут.ср.}$ По усредненным за каждый месяц среднесуточным значениям вычисляли среднемесячные температуры подстилок $T_{мес.ср.}$

Таблица 1. Местоположение участков в Хибинском горном массиве, на которых исследована температура подстилок в 2013-2018 годах

| Гора | Экспозиция склона | Горно-растительный пояс | Биоценоз | Координаты | Высота над ур.м., м |
|--|---------------------------|-------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------|
| Партомчорр | ЮВ | Горно-таежный | СЕЛ | 67°49'39" с. ш., 33°40'18" в. д. | 290-310 |
| Рисчорр | С | Горно-тундровый | ГТ | 67°49'17", 33°40'04" | 430 |
| | СЗ | Лесотундровый | БК | 67°49'22", 33°40'10" | 360-380 |
| | СЗ | Горно-таежный | ЕСБ | 67°49'36", 33°40'06" | 290-310 |
| Долина реки Кунийок между горами Путеличорр и Партомчорр | Межгорная долина | Горно-таежный | а) С | 67°50'14.8", 33°39'37" | 235 |
| | | Горно-таежный | а) ГС | 67°50'16.4", 33°39'22" | 236 |
| | | Горно-таежный | б) С | 67°50'14", 33°39'37" | |
| | | Горно-таежный | б) ГС | 67°50'16", 33°39'22" | |
| | | Горно-таежный | В | 67°49'49", 33°39'00" | 234 |
| | | Горно-таежный | ГВ | 67°49'51", 33°38'46" | 221 |
| Юкспорр | плато | Горно-тундровый | ВТ | 67°39'32", 33°46'44" | 710-730 |
| | ЮВ | Горно-тундровый | ГТ | 67°39'06", 33°46'44" | 625-645 |
| | ЮВ | Лесотундровый | БК | 67°38'59", 33°47'17" | 460-490 |
| Суолайв | З | Горно-тундровый | ГТ | 67°39'32", 34°10'03" | 387-550 |
| | З | Лесотундровый | БК | 67°39'30", 34°10'13" | 328-340 |
| | З | Горно-лесной | ЕЛ | 67°39'26", 34°10'14" | 260-270 |
| Вудъяврчорр | Плато (Ботанический цирк) | Горно-тундровый | ГТ | 67°38'34", 33°39'12" | 545 |
| | | Горно-тундровый | ГТ | 67°38'34", 33°39'12" | 547 |
| Вудъяврчорр (ущелье Скальное) | СЗ | Горно-тундровый | ГТ | 67°36'01", 33°36'16" | 510 |
| | СЗ | Лесотундровый | БК | 67°35'56", 33°35'44" | 392 |
| | ЮВ | Лесотундровый | БК | 67°35'56", 33°35'42" | 390 |
| Вудъяврчорр | высокогорное плато | Гольцовый пояс | ВП | 67°35'56", 33°35'43" | 1023 |
| | | | ВП | 67°35'56", 33°35'43" | 1021 |

Обозначения: СЕЛ - сосново-еловый лес; ГТ – горная тундра; БК - березовое криволесье; ЕСБ – елово-сосново-березовый лес; С - сосновый лес а) 2015 г., б) 2018 г.; ГС – горелый лес; В-вырубка; ГВ – горелая вырубка; ВТ – высокогорная тундра; ЕЛ – еловый лес, ВП - высокогорное плато.



Результаты и обсуждение

На основе показаний термохронов установлены минимальные и максимальные среднесуточные значения температуры в подстилках горно-растительных поясов в июле и августе; определены суммы эффективных и активных температур подстилок; проведено сравнение температур между высотными поясами в пределах одноименных поясов на склонах разной экспозиции.

В экосистемах горно-таежного пояса (221–310 м. над ур. м.) среднесуточные температуры подстилки увеличиваются с высотой над ур. м. (т.е. на склонах по сравнению с безлесными участками в межгорной долине). В экосистемах горно-тундрового пояса (430–1023 м. над ур. м.) и в поясе березовых криволесий дифференцирующее влияние на различия в $T_{мес\text{cp}}$ температурах подстилок в самый теплый месяц - июль оказывает фактор экспозиции склона (достоверность отличий $T_{мес\text{cp}}$ июля в подстилках; достоверность отличий динамики температуры; количество дней с эффективными $T_{сут\text{cp}} \geq +10$ °С; сумма положительных температур в подстилке). Для пояса березового криволесья влияние высоты над ур. моря (340–460 м. над ур. м.) на различие среднесуточных температур не очевидно (рис. 1).

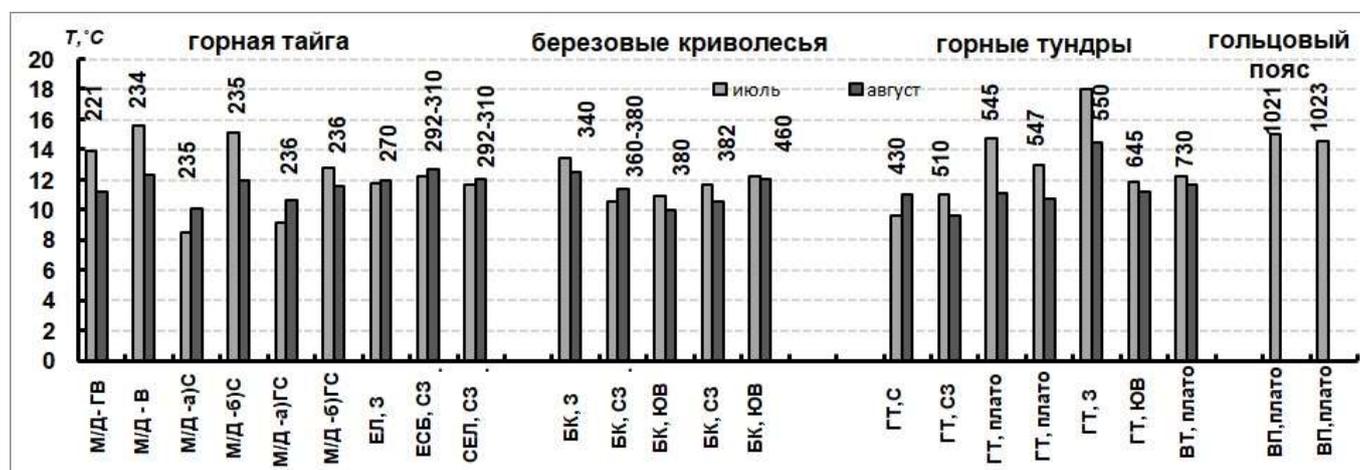


Рис. 1. Сравнение значений и динамики температуры на 23 исследованных участках за 2013-2018 гг.

Таким образом, дифференцирующее влияние на температурный режим горных подстилок оказывают, в основном, 3 фактора: «сезонность», «экспозиция склона», «высотная поясность».

Фактор сезонности является основным и определяет изменение температуры атмосферного воздуха, которая влияет на прогрев подстилок (весной) и их охлаждение (осенью), т.е. на сезонную смену процессов поглощения тепла подстилками и его излучения (т.е. на достижение эффективных значений температуры весной и обратный переход через пороговые значения осенью; поглощение или излучение тепла подстилками, усиление различий, вызванных факторами высотной поясности и экспозиции склонов, при переходе от июля к сентябрю).

Высотная поясность определяет достоверные различия в температурах среднесуточных, минимальных и максимальных внутрисуточных и среднелетних значений температуры в подстилках; различия в динамике среднесуточных температур, в ее сезонной вариабельности, в сроках перехода через среднесуточное значение температуры $< +5$ °С в конце вегетационного сезона (в сентябре). Эти различия проявляются для горно-лесного и



горно-тундрового поясов на протяжении всего вегетационного сезона, причем усиливаются от июля к сентябрю, то есть так же подвержены влиянию фактора сезонности.

Экспозиция горных склонов определяет различия в таких показателях температурного режима подстилок, как: среднемесячные и максимальные значения температуры, число суток с эффективными $T_{сут_{cp}} \geq +10$ и $< +10$ °С, сумма положительных температур в подстилке. Однако достоверное дифференцирующее влияние этого фактора установлено для подстилок горно-тундрового и пояса березовых криволесий только в самый теплый месяц вегетационного сезона – июль.

Выводы

Дифференцирующее влияние на температурный режим горных подстилок оказывают факторы: «сезонность», «экспозиция склона», «высотная поясность». Большинство достоверных различий температурных показателей (различия в величине и динамике среднемесячных температур, сезонной и суточной вариабельности температуры, сроках перехода температуры в подстилках через пороговые величины +5 и +10 °С) определялось высотной поясностью.

Фактор сезонности определяет общий ход динамики температуры в горных подстилках и является более мощным фактором, усиливающим различия связанным с влиянием факторов высотной поясности и экспозиции горных склонов. Фактор экспозиции горных склонов определяет достоверное дифференцирующее влияние для горно-лесных подстилок только в самый теплый месяц вегетационного сезона – июль.

Литература

Атлас Мурманской области. М.: ГУГК, НИГЭИ, ЛГУ, 1971. - 34 с.

Зенкова, И.В. К характеристике летней динамики температуры подстилок в горах Хибинского массива (Мурманская область) // Фундаментальные и прикладные вопросы лесного почвоведения: Материалы докладов VI Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 85-87.

Старцев В.В., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Годовая динамика температур органогенных горизонтов почв Приполярного Урала // Известия Коми научного центра. 2016. № 2. С. 28–35.

Шмакова Н.Ю., Ушакова Г.И., Костюк В.И., Горно-тундровые сообщества Кольской Субарктики (эколого-физиологический аспект). - Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – 167 с.



КРУГЛЫЙ СТОЛ. СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО И ПРИКЛАДНОГО ПОЧВОВЕДЕНИЯ: ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЦИФРОВОЕ (УМНОЕ) СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО



УДК 631.431:631.51

ПАХАТЬ ИЛИ НЕ ПАХАТЬ? ПЛЮСЫ И МИНУСЫ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

Железова С.В., Мельников А.В., Ананьев А.А.

ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация
soferrum@mail.ru ; diatrima@list.ru ; ananev_987@mail.ru

TO TILL OR NOT TO TILL? PROS AND CONS OF NO-TILLAGE
Zhelezova S.V., Melnikov A.V., Ananiev A.A.

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Annotation: In a ten-year field experiment the technologies of Tillage and No-tillage was compared. The pros and cons of the No-tillage are shown. The cons are: significantly increasing of soil density, weed infestation, the cost of pesticides applying. The pros are: soil moisture storage capacity and relatively stable crop yield.

Введение

Вспашка с оборотом пласта с последующей культивацией традиционно является основным приёмом обработки почвы. Полный цикл подготовки почвы к посеву позволяет создать в пахотном слое благоприятные агрофизические условия для развития культурных растений, добиться оптимальных показателей плотности сложения, твёрдости, скважности почвы. Эффективность такой обработки доказана временем и не вызывала сомнения у многих поколений аграриев. Но постоянное, в течение десятилетий, применение вспашки исторически привело к проблемам планетарного масштаба: развитию эрозии, потере плодородия и запасов гумуса (Status of the World's Soil resources, 2015). Помимо этого, технология полного цикла подготовки почвы, основанная на вспашке, является самым энергозатратным приёмом из всей цепочки возделывания сельскохозяйственных культур. В силу указанных причин в последние десятилетия наблюдается общемировая тенденция перехода к ресурсосберегающим технологиям, включая нулевые технологии (No-till, Zero-till) и прямой посев (Soane et al., 2012; Lal, 2015) По данным FAO лидерами по внедрению почвосберегающих технологий являются Бразилия, Аргентина, Канада, США, Австралия. В последнее десятилетие нулевые технологии обработки почвы и прямой посев пришли и в Россию. Успешный опыт применения данных технологий есть в Самарской, Ростовской областях, Алтайском, Краснодарском, Ставропольском краях, в республике Удмуртия и других регионах. Однако пока рано говорить о системе No-till, как о многолетней, состоявшейся и отлично зарекомендовавшей себя технологии в условиях России. По нашим оценкам, по результатам анализа деловой сельскохозяйственной прессы и научных публикаций, под прямым посевом в России в целом находится не более 1% посевных производственных площадей. И как многолетний опыт, технология прямого посева при нулевой обработке почвы в чистом виде встречается пока очень редко. В то же время, несмотря на сложность и дороговизну адаптации таких технологий (Дридигер, 2016), в последние годы интерес к ним возрастает. В России уже несколько лет существует ассоциация сторонников прямого посева (<http://aspp-rg.ru>). Главные «плюсы» прямого посева и нулевых обработок – энергосбережение и почвосбережение. В то же время у нулевой технологии есть существенные минусы, которые наиболее ярко проявляются в первые годы после начала освоения. Многие исследователи отмечают, что при минимизации обработок почвы и при переходе к прямому посеву наблюдается переуплотнение верхнего слоя почвы,



общее ухудшение фитосанитарной обстановки с усилением развития грибных болезней и увеличением засорённости посевов (Железова с соавт., 2017). Технология прямого посева подразумевает также увеличение пестицидной нагрузки, что может приводить к накоплению фитотоксичности почвы, поэтому вопрос комплексной оценки технологии является весьма актуальным. Уникальным полигоном, где более 10 лет проводятся комплексные всесторонние исследования по сравнению ресурсосберегающей и традиционной систем обработки почвы, является многолетний опыт Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева.

Данное исследование является неотъемлемой частью комплексного многолетнего мониторинга плодородия и продуктивности агрофитоценоза в научно-производственном опыте. Цель исследования: продемонстрировать плюсы и минусы использования нулевой обработки почвы при интенсивном возделывании культур в системе четырехпольного севооборота на дерново-подзолистой почве.

Объекты и методы

Объектом исследования является Полевой научно-производственный опыт Центра точного земледелия (далее ЦТЗ). Опыт общей площадью 6 га заложен в 2008 г на территории Полевой опытной станции РГАУ – МСХА имени К.А.Тимирязева на ровном участке размером 240×250 м. Полигон объединяет четыре поля, площадь полей по 0,8 и 1,4 га (рис. 1). Набор культур севооборота: озимая пшеница + горчица пожнивно; картофель; ячмень; викоовсяная смесь. Севооборот развернут во времени и пространстве.



Рис.1. Схема размещения полей и делянок под разными технологиями на полигоне Центра точного земледелия РГАУ–МСХА имени К.А.Тимирязева

В опыте сравниваются две технологии обработки почвы. Вариант «Вспашка» (классическая традиционная обработка) включает послеуборочное дискование стерни, озимую вспашку с оборотом пласта и предпосевную культивацию почвы. Вариант «Ресурсосберегающая обработка» представляет собой минимальную обработку почвы



дискованием на глубину 10–12 см под культуры картофель и ячмень, и нулевую обработку (прямой посев) под пшеницу и викоовсяную смесь. Таким образом, из года в год на каждом из полей севооборота в двукратной повторности по стационарным площадкам воспроизводится схема обработки почвы. Это позволяет проводить многолетний мониторинг почвы и посевов в условиях применения разных по интенсивности обработок почвы. Применение ресурсосберегающих технологий чередуется во времени по схеме: 2 года минимальная, затем 2 года нулевая, и так далее (на рис.1 данные полосы помечены как «Нулев./миним.»). В опыте изучают почвенные, фитоценотические и экономические аспекты применения ресурсосберегающей и традиционной обработки почвы.

Комплексное изучение почвенных свойств опытных полей ЦТЗ

Почвенный покров опытного участка неоднороден, так как сформирован на моренных отложениях с неравномерным гранулометрическим составом, что проявляется в зонах различной продуктивности на опыте. Почва участка дерново-подзолистая средне- и легкосуглинистая иллювиально-железистая, глееватая (Классификация почв СССР, 1977).

Агрохимическое обследование почвы опыта ЦТЗ проводится регулярно с 2008 г. с отбором образцов по сетке и определением основных агрохимических свойств (по ГОСТ).

Агрофизические обследования почвы опыта включают: пространственно-временные исследования влажности почвы (по ГОСТ и электронным влагомером Aquaterr), твёрдости (пенетрометр DICKEY-John), определение объёмной массы, удельного электрического сопротивления методом вертикального электрического зондирования (LandMapper).

Микробиологическую активность почвы при разных способах обработки оценивают по разложению льняного полотна, а также проводят исследования микробного сообщества почвы с посевом на селективные среды.

Мониторинг агрофитоценозов ЦТЗ

Каждое из четырех полей ЦТЗ является самостоятельным агрофитоценозом (далее АФЦ), где в пространстве и во времени изучают биометрические показатели посевов, вегетационные индексы, показатели продуктивности, урожайности, численность и видовой состав сеgetального сообщества, распространение заболеваний, последствие применения пестицидов и др. Для оценки вегетационного индекса NDVI использовали дистанционные (спутниковый мониторинг; съёмка с беспилотных аппаратов) и наземные методы исследования оптическим датчиком GreenSeeker RT200. Для биометрических измерений посевов и учёта сеgetальной флоры выбрана методика сеточного картографирования с размещением учётных рамок (0,25м²) в узлах регулярной сетки (3×7 м). На каждом поле в один срок обследования размещается от 240 до 560 учётных точек. Учёт урожайности зерновых на опыте проводят дробным методом с составлением карты урожайности. Положение каждой учётной точки любого обследования зафиксировано в стационарной локальной системе координат и имеет географическую привязку, поэтому все данные о почве и посевах доступны к обработке в любой ГИС-программе. Вся информация многолетнего мониторинга АФЦ опыта, начиная с 2008 г. и по настоящее время накапливается в Базе данных ЦТЗ. Ежегодно оценивают все данные по урожайности и засорённости посевов по сравнимым вариантам обработки почвы на фоне метеоусловий вегетационного сезона. Сопоставление данных по урожайности культур с экономическими затратами на их производство позволяет сравнить традиционную и ресурсосберегающую технологии не только с научных позиций, но и с экономических (Мельников, Железова, 2019).



Результаты и обсуждение

Сравнение твёрдости почвы при традиционной, нулевой и минимальной обработке

Почва опытного участка неоднородна по гранулометрическому составу. Это влияет на все её агрофизические свойства и создает неравномерный фон для развития растений. Способ основной обработки почвы призван оптимизировать условия для роста корней в пахотном слое. Важным агропроизводственным показателем является твёрдость почвы (сопротивление пенетрации), т.к. она оказывает существенное влияние на продуктивность посевов. Твёрдость почвы – комплексный и динамичный показатель, который зависит от гранулометрического состава и влажности почвы, от способа обработки. Оценка пространственного варьирования твёрдости почвы имеет важное значение при осуществлении дифференцированных подходов в точном земледелии, а также при агропроизводственной оценке различных технологий обработки почвы. На примере двух лет обследований (2010 и 2017) на поле 2-ЦТЗ при изучении пространственной картины распределения твёрдости почвы ранней весной (в момент наибольшего влагонасыщения) было показано, что запас влаги в слое 0–30 см и твёрдость почвы в слое 10–20 см зависит от способа обработки (рис. 2). В подпахотном слое (20–30 см) пространственная картина распределения твёрдости зависит как от обработки почвы, так и от подстилающей породы.

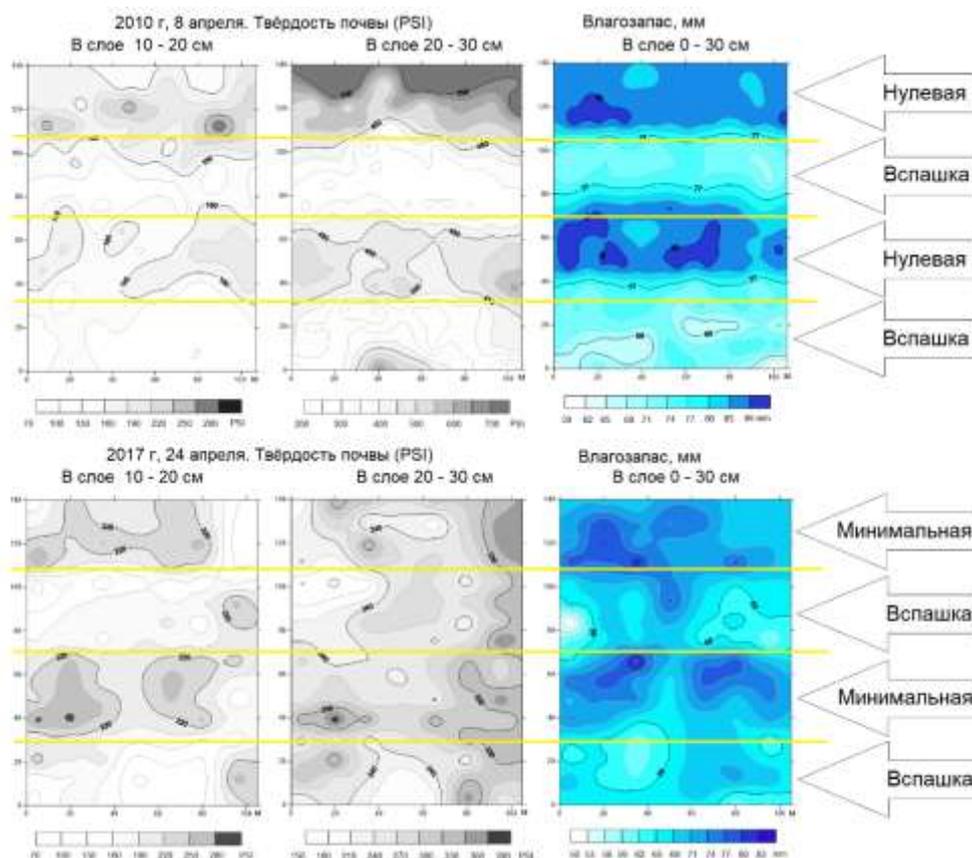


Рис.2. Карты пространственного распределения твёрдости почвы (PSI) на глубинах 10–20 и 20–30 см и влагозапаса (мм) в слое 0–30 см на поле 2-ЦТЗ в апреле 2010 и 2017 гг.

Развитие биомассы посева в условиях разных обработок почвы

По результатам нескольких лет наблюдений в опыте ЦТЗ, твёрдость почвы на варианте нулевой обработки как правило, на 15-50% выше, чем на варианте «вспашка». Это, наряду с последствием гербицидов, негативно сказывается на общем развитии посевов во время



вегетации. Косвенно развитие биомассы посева оценивают по вегетационному индексу NDVI (рис. 3). На варианте нулевой обработки почвы посева озимой пшеницы и викоовсяной смеси всегда имеют биомассу ниже, чем на варианте «Вспашка». Биомасса ячменя, наоборот, выше на варианте минимальной обработки, чем на вспашке. Тем не менее, урожайность зерновых на опыте ЦТЗ зависит в большей степени от применения удобрений и метеоусловий сезона, нежели от способа обработки почвы.

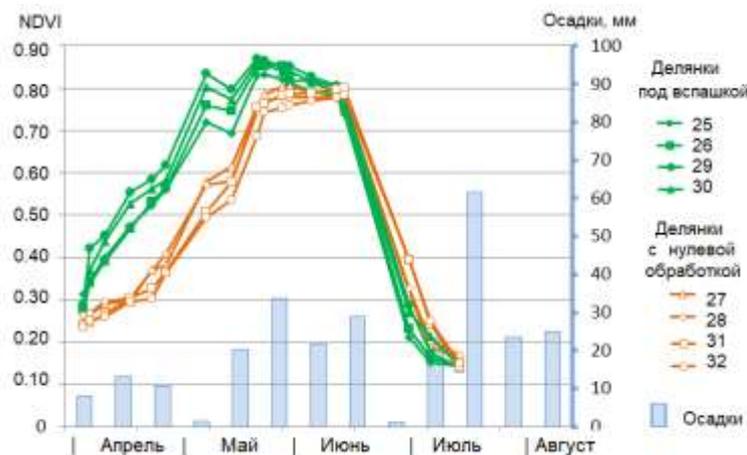


Рис.3. Динамика изменения вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы (2016 г.) в условиях двух способов обработки почвы с учётом осадков.

Большая биомасса посева во время вегетации – это не всегда хорошо, т.к. в условиях избыточного увлажнения это может привести к полеганию посевов и потерям урожая. На варианте «Нулевая обработка, прямой посев» биомасса развивается хуже, поэтому полегания посевов практически не бывает. Это несомненный плюс данной технологии.

Выводы

Комплексный мониторинг почвы и посевов в условиях многолетнего применения минимальной, нулевой и традиционной технологии обработки почвы позволяет сделать вывод о том, что применение ресурсосберегающих технологий обработки почвы имеет как положительные последствия, так и отрицательные. К отрицательным относится ухудшение агрофизических свойств почвы и накопление фитотоксичности. К положительным – накопление пожнивных остатков, повышение влагоудерживающей способности почвы, получение пусть не рекордного, но относительно стабильного урожая зерна.

Литература

- Status of the World's Soil Resources (2015) <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- Lal R. (2015) A system approach to conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, **70**, 82–88. DOI:10.2489/jswc.70.4.82A
- Soane B.D. (2012), Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil & Tillage Research* **118**, 66–87. DOI: 10.1016/j.still.2011.10.015
- Дридигер В.К. (2016) Ошибки при освоении технологии No-till. *Земледелие* 2016, № 3, 5–9.
- Железова С.В. (2017), Акимов Т.А., Белошапкина О.А. и др. Влияние разных технологий возделывания озимой пшеницы на урожайность и фитосанитарное состояние посевов (на примере полевого опыта Центра точного земледелия РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева). *Агрохимия* 2017, № 4, 72–82.
- Мельников А. (2019), Железова С. Традиционная вспашка или нулевая технология – что выгоднее для производства озимой пшеницы в нечерноземной зоне России? *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса* 2019, №1 (39), 35–40. DOI: 10.32935/2221-7312-2019-39-1-35-40



УДК 631.42

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ В РЕГИОНАХ

Макаров О.А.^{1,2}, Строков А.С.³

¹Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

²Учебно-опытный почвенно-экологический центр МГУ имени М.В. Ломоносова, 141592, Московская область, Солнечногорский район, п/о Ударный, пос. Чашниково

³Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, 119571, Москва, проспект Вернадского, 82, стр.1

Эколого-экономический анализ деградации земель различных регионов России проводился с помощью методов корреляционно-регрессионного анализа и «оценки действия / бездействия».

Для Тульской области при помощи пространственной и динамической моделей было показано, что рост посевной площади прямо коррелирует с ростом площади деградированных земель. Это может быть связано с истощением почв из-за недостаточного внесения минеральных и органических удобрений. Была установлена отрицательная динамика баланса полезных элементов в почвах Тульской области в период 1995-2014 гг., что является негативным фактором в развитии сельского хозяйства исследуемого региона.

Изучение динамики изменения площадей различных видов земель в Белгородской, Липецкой и Тульской областях в период 2001 - 2009 гг. позволило установить факт забрасывания многих экономически неэффективных сельскохозяйственных земель с последующим зарастанием древесной растительностью. Увеличение площади лесов в этих регионах привело к росту стоимости экосистемных услуг. Применение метода «оценки действия / бездействия» Й. фон Брауна показало, что восстановление продуктивности земель и поддержка экосистемных услуг экономически оправданы.

Таким образом, на примере тех регионов Центральной России, где существенные площади занимают черноземные почвы, удалось показать активное развитие процессов деградации земель и снижение их продуктивности в 2000-х годах. Успешное сельскохозяйственное (главным образом, растениеводческое) развитие этих областей в настоящее время свидетельствуют о высокой эффективности экономической политики российского государства в сфере поддержки сельскохозяйственного производства и борьбы с деградацией земель

Ключевые слова: деградация земель, баланс плодородия почв, растениеводство, интенсификация сельскохозяйственного производства, минеральные и органические удобрения, экосистемные услуги

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-010-00775а.



УДК 336.211.1

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА КАДАСТРОВОЙ СТОИМОСТИ МЕЛИОРИРУЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ

Сапожников П.М.¹, А.К. Оглезнев²

¹Факультет почвоведения МГУ, Москва, Российская Федерация
sap-petr@yandex.ru

²Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Российская Федерация
korneich-pochvoved@yandex.ru

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE CADASTRAL VALUE OF RECLAIMED LAND

Sapozhnikov P.M.¹, A.K. Ogleznev²

¹ Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

²Soil Institute B.B. Dokuchaeva, Moscow, Russian Federation

Annotation: The sensitivity of the approaches to calculating cadastral value to different soil-geographical conditions is shown. With ameliorative impacts on agrolandscapes, their inventory value changes significantly. In the conditions of irrigation, the increase in inventory value can reach 60-100%, and in the dehumidification conditions, the increase is 22-52%.

В 2017 году Министерством экономического развития России утверждены методические указания о государственной кадастровой оценке(1). Большой раздел методических указаний посвящен кадастровой оценке сельскохозяйственных угодий. Методология расчета кадастровой стоимости сельскохозяйственных угодий базируется на определении нормативной (потенциальной) урожайности и нормативных затрат определяемых по технологическим картам (2). При этом расчет кадастровой стоимости базируется на материалах агроклиматического оценочного зонирования. Вместе с тем, в методических указаниях отсутствует методология расчета кадастровой стоимости мелиорируемых земель в условиях орошения и осушения.

При расчете величины нормативной урожайности используется величина агроклиматического потенциала (АП), который характеризует влияние климатических условий на урожайность зерновых культур. Величина АП рассчитывается по формуле (3):

$$АП = \frac{\sum t > 10^{\circ}C (КУ - P)}{КК + 100},$$

где $\sum t > 10^{\circ}C$ — сумма активных температур больше 10 градусов,

КУ - коэффициент увлажнения, отношение показателей количества годовых осадков к испаряемости,

КК — коэффициент континентальности климата,

P — поправка к КУ.

При расчете величины кадастровой стоимости сельскохозяйственных угодий орошаемых земель необходимо учитывать изменение (увеличение) агроклиматического потенциала в связи с увеличением количества осадков на величину поливной нормы. В условиях орошения также появляются возможности выращивания высокодоходных сельскохозяйственных культур. К величине затрат на орошаемых землях добавляются эксплуатационные затраты на работу оросительных систем.



Величину кадастровой стоимости орошаемых земель определяли на примере почв Оренбургской области (4). В ходе работы была произведена оценка и сравнение кадастровых стоимостей для орошаемых и богарных почв. В качестве объекта был выбран третий земельно-оценочный район, характеризующийся самыми засушливыми условиями в регионе. Орошение существенно изменяет агроклиматический потенциал территории. Так происходит увеличение коэффициента увлажнения с 0,50 (богара) до 0,77 (орошение), в соответствии с нормами полива количество поступающей влаги увеличивается до 2690 мм. Таким образом, показатель агроклиматического потенциала увеличился с 4,6 до 6,9. В качестве объектов исследования орошаемых почв были выбраны черноземы южные, аллювиально-дерновые, лугово-черноземные и темно-каштановые почвы. Расчет кадастровой стоимости богарных и орошаемых почв представлен в таблице 1.

Таблица 1. Кадастровая стоимость богарных и орошаемых почв Оренбургской области

| Тип почвы | Кадастровая стоимость | |
|---|---|--|
| | богарных почв, руб./га (КУ = 0,5*, АП = 4,5**) | орошаемых почв, руб./га (КУ = 0,77, АП = 6,9) |
| Черноземы южные | 3 300 | 5 400 |
| Аллювиально-дерновые насыщенные остепняющиеся | 7 200 | 14 800 |
| Лугово-черноземные | 4 000 | 6 700 |
| Темно-каштановые | 4 700 | 7 700 |

* КУ — коэффициент увлажнения;

** АП — агроклиматический потенциал.

Показатели кадастровой стоимости орошаемых почв значительно увеличилась во всех случаях. Максимальное увеличение (около 100 %) отмечено для аллювиально-дерновых остепняющихся почв. Для южных черноземов, лугово-черноземных и темно-каштановых почв это увеличение составляет от 60 до 70 %. Таким образом, в условиях орошения увеличение кадастровой стоимости земель может достигать 60-100%.

Таблица 2. Нормативная урожайность и кадастровая стоимость земель без осушения.

| Почва | Урожайность культур, ц/га | | | Кадастровая стоимость, руб/га |
|---|---------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|
| | Зерновые | Картофель | Многолетние травы | |
| Дерново-подзолистые почвы | 23,6 | 160,1 | 46,7 | 34600 |
| Дерново-подзолистые слабogleеватые | 21,6 | 133,4 | 42,8 | 29700 |
| Дерново-подзолистые глееватые | 14,2 | 54,2 | 28,1 | 27200 |
| Комплекс дерново-подзолистых (60%), дерново-подзолистых слабogleеватых (20%) и дерново-подзолистых глееватых почв (20%) | 17,5 | 109,5 | 34,7 | 26700 |



Влияние осушения на кадастровую стоимость гидроморфных почв изучали на примере почв Можайского района Московской области: дерново-подзолистых почв (без признаков оглеения), дерново-подзолистых слабоглееватых почв, дерново-подзолистых глеевых почв и комплекса дерново-подзолистых почв (60%), дерново-подзолистых слабоглееватых почв (20%), дерново-подзолистых глееватых почв (20%).

При расчете кадастровой стоимости осушаемых земель необходимо учитывать следующее:

- эксплуатационные затраты на осушение составляют 400 рублей/га;
- изменяется группа пригодности для возделывания сельскохозяйственных культур на заболоченных почвах. Они пригодны в этом случае не только для возделывания кормовых, но и для других сельскохозяйственных культур.

- осушение меняет контрастность почвенного покрова, значительно уменьшая его.

В таблице 2 приведены значения нормативной урожайности и величины кадастровой стоимости неосушенных почв Можайского района Московской области, а в таблице 3 — показатели для осушенных земель.

Таблица 3. Нормативная урожайность и кадастровая стоимость осушенных земель.

| Почва | Урожайность культур, ц/га | | | Кадастровая стоимость, руб/га |
|---|---------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|
| | Зерновые | Картофель | Многолетние травы | |
| Дерново-подзолистые почвы | 25,4 | 177,9 | 50,2 | 42500 |
| Дерново-подзолистые слабоглееватые | 25,4 | 177,9 | 50,2 | 44100 |
| Дерново-подзолистые глееватые | 21,9 | 135,4 | 43,8 | 39200 |
| Комплекс дерново-подзолистых (60%), дерново-подзолистых слабоглееватых (20%) и дерново-подзолистых глееватых почв (20%) | 24,7 | 169,4 | 48,9 | 40700 |

Влияние осушения значительно сказывается на нормативной урожайности сельскохозяйственных культур. Если на неосушенных землях колебания в нормативной урожайности зерновых культур достигают 60%, то в условиях осушения они составляют 15%. При этом кадастровая стоимость земель осушенных без признаков гидроморфизма увеличивается на 20-25%, а кадастровая стоимость осушенных земель с явно выраженными признаками гидроморфизма увеличивается от 44 до 52%.

Таким образом, показана чувствительность подходов расчета кадастровой стоимости к различным почвенно-географическим условиям. При мелиоративных воздействиях на агроландшафты существенно меняется их кадастровая стоимость. В условиях орошения увеличение кадастровой стоимости может достигать 60-100%, а в условиях осушения - 22-52%.



Литература

1. Методические указания о государственной кадастровой оценке. Утверждены приказом Минэкономразвития N226 от 12 мая 2017 г.
2. Государственная кадастровая оценка земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации. Под общей редакцией Сапожникова П.М., Носова С.И. – М.: ООО «НИПКЦ ВОСХОД-А». – 2012. – 160 с.
3. Справочник агроклиматического оценочного зонирования субъектов Российской Федерации. Учебно-практическое пособие / Под ред. Носова С.И. – Ответственный исполнитель: Оглезнев А.К. – М.: Маросейка. – 2010. – 208 с.
4. Сапожников П.М., Столбовой В.С., Оглезнев А.К., Кузьмина В.И. Кадастровая оценка почв земель сельскохозяйственного назначения Оренбургской области. - Использование и охрана природных ресурсов в России. №1, 2018, с. 30-36.