

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
инженерной и экологической геологии***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Трофимов В.Т.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2021

Содержание:

1.	К вопросу о формировании свойств глинистых грунтов термальных полей: трансформация минерального состава и микростроения (на примере южной Камчатки)	
	М.С. Чернов, В.В. Крупская, В.Н. Соколов	2
2.	Живые организмы массивов глинистых грунтов	
	В.А. Королёв	6
3.	Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании	
	М.С. Чернов, В.Н. Соколов, О.В. Разгулина	11
4.	Особенности состава, строения и свойств швентойских песчаников (Džšv) и их практическое значение	
	Е.Н. Самарин, И.В. Аверин, М.С. Чернов, О.В. Зеркаль, Е.В. Щепетова	16
5.	Изменение состава, строения и свойств перемещенных дисперсных грунтов при антропогенном литогенезе	
	Н.В. Абакумова, С.К. Николаева, Е.Н. Самарин	21
6.	Применение акустоэмиссионного эффекта памяти для определения напряжений в массиве горных пород	
	Э.В. Калинин	26
7.	Планетарными процессами управляет космическая энергия	
	А.Д. Жигалин, Е.А. Крахина, В.С. Лавров	31
8.	Оползневые процессы на участке Воробьевых гор (Москва): история развития представлений и современные воззрения	
	О.В. Зеркаль, И.В. Аверин, О.С. Барыкина, С.Ю. Маленкина, Е.Н. Самарин, И.К. Фоменко, И.П. Гвоздева	36
9.	Математическое моделирование процесса консолидации грунта	
	Н.Б. Артамонова, С.В. Шешенин	41

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ: ТРАНСФОРМАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И МИКРОСТРОЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ)

М.С. Чернов, В.В. Крупская, В.Н. Соколов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический
факультет, chernov@geol.msu.ru*

Гидротермальные глинистые грунты – это один из наименее изученных с инженерно-геологической точки зрения типов глинистых грунтов. При этом в России (на Камчатке) и в ряде других стран, где развит современный вулканизм (Исландия, Испания, Италия и др.) существуют районы с развитием таких грунтов, которые могут попадать в область инженерно-хозяйственной деятельности человека.

Гидротермальные системы в районах современного вулканизма формируются за счет взаимодействия близкого к поверхности эндогенного источника энергии (магматического очага или остывающего интрузивного тела) с подземными водами. При контакте с источником тепла подземные воды нагреваются и смешиваются с эндогенным флюидом, в результате чего образуется перегретая паро-газовая смесь. По мере подъема горячие гидротермы взаимодействуют с вмещающими породами и частично их растворяют или, взаимодействуя с магматическими минералами, образуют новые гидротермальные минеральные комплексы. В структуре гидротермальных систем формирование массивов гидротермальных глинистых грунтов происходит вблизи дневной поверхности, в так называемой области гипергенеза гидротермальных систем – зоне интенсивного смешения поверхностных вод с восходящим потоком паро-газовой смеси.

Таким образом, под гидротермальными глинистыми грунтами мы понимаем первый от поверхности глинистый горизонт, формирующийся в результате гидротермальных преобразований поверхностных (вулканогенных, вулканогенно-осадочных, покровных, склоновых) образований и развитый в пределах термальных полей – мест естественной разгрузки гидротермальных систем в районах современного вулканизма.

Толща гидротермальных глинистых грунтов образует сплошной покров мощностью 0,5-5 м (иногда достигает 10-15 м) в районе развития термальных полей, приуроченных к выходам на поверхность проницаемых зон в Земной коре, по которым флюид поднимается к дневной поверхности. Чаще всего в толще гидротермальных глинистых грунтов сверху вниз четко выделить два горизонта: серно- и углекислотного выщелачивания, характеризующихся различным строением и минеральным составом.

Глинистые грунты в зоне сернокислотного выщелачивания имеют пеструю охристо-

красную окраску и обладают брекчиевидной текстурой. В минеральном составе преобладает глинистый минерал каолинит. Грунты имеют блочное строение, между блоками присутствует налет ожелезнения либо тонкие корочки минералов кремнезема. Блоки разламываются с образованием раковистого излома. В выделенном горизонте присутствует большое количество псевдоморфоз по обломкам исходных пород.

Зона углекислотного выщелачивания сложена глинами зеленовато- и синевато-серого цветов. Она занимает большую часть толщи. В минеральном составе преобладают глинистые минералы группы смектита и смешанослойный минерал каолинит-смектит, реже хлорит. В ней также присутствуют псевдоморфозы по обломкам материнских пород. Характерной особенностью выделенной зоны является наличие участков пропаривания. К ним приурочены скопления и сплошные корочки микрокристаллов пирита, марказита и кремнекислоты. Такие структуры обладают повышенной хрупкостью.

В гранулометрическом составе гидротермальных глинистых грунтов преобладают глинистая и пылеватая фракции, причем содержание глинистой фракции иногда достигает 90%. Однако, в естественном сложении глинистая фракция таких грунтов полностью агрегирована, что связано с температурой образования и повышенной кислотностью среды. С увеличением глубины залегания грунтов содержание песчаной и пылеватой фракций увеличивается. Так же было установлено, что во всех гидротермальных глинистых грунтах присутствуют минеральные наночастицы (фракции $<0,1$ мкм), содержание которых в верхней части разрезов достигает 24-29% и к его основанию снижается до 4-9%. В минералогическом отношении они представлены высокодисперсными частицами преобладающих глинистых минералов в данном горизонте.

Вся толща гидротермальных глинистых грунтов обладает схожим, но неоднородным микростроением. В исследуемых грунтах преобладает микростроение матричного и псевдоморфно-матричного типов. Глинистая матрица неориентированная, сложена микроагрегатами глинистых частиц и псевдоморфозами глинистых минералов по зернам материнской породы. В основании толщи гидротермальных глин микростроение имеет унаследованный характер, оно относится к псевдоморфно-матричному типу и внешне неотлично от микростроения андезита. Такой характер изменения микростроения в толще глинистых грунтов обуславливает их уплотнение и упрочнение вниз по разрезу.

Процесс формирования микро- и наностроения гидротермальных глинистых грунтов во многом определяется устойчивостью минералов к гидротермальному преобразованию. Вначале преобразуется вулканическое стекло, затем разрушается плагиоклаз и рудные минералы. Замещение минералов материнской породы новообразованными глинистыми минералами чаще всего происходит псевдоморфно. Поэтому в глинистой матрице

присутствуют множественные включения и скопления псевдоморфоз глинистых частиц по исходным структурным элементам.

Проведенные исследования показали, что в изученных гидротермальных глинистых грунтах наряду с участками микростроения, в которых между структурными элементами преобладают ближние коагуляционные и переходные контакты, сохраняются многочисленные участки глинистой матрицы и псевдоморфоз по зернам первичных минералов, между которыми преобладают фазовые контакты кристаллизационного типа. Также при осаждении SiO_2 в виде разных минеральных фаз (опал, кристобалит, кварц) формируются новые контакты цементационного типа. В итоге формируется грунт со смешанным типом контактов (фазовых, переходных и коагуляционных). Наличие фазовых контактов в грунте наряду с коагуляционными обуславливает повышенную структурную прочность гидротермальных глин и, в ряде случаев, определяет хрупкий и хрупко-пластичный характер их разрушения при срезе и сжатии.

С увеличением интенсивности гидротермальной переработки структурные элементы материнской породы полностью замещаются микроагрегатами глинистых минералов. В результате такого преобразования практически во всех изученных образцах наблюдается формирование участков, характеризующихся, в зависимости от минерального состава и морфологии наночастиц, наностроением доменоподобного, глобулярно-пластинчатого, губчатого, ячеистого и смешанного типов.

Все это приводит к резкому возрастанию количества контактов между минеральными частицами. За счет повышения дисперсности происходит увеличение пористости и возрастание удельной поверхности. Улучшается сорбционная способность и гидрофильность гидротермальных глинистых грунтов, повышается их пластичность.

Особенности микростроения и характер структурных связей напрямую влияют на значения показателей физических и физико-химических свойств и в значительной степени определяют величину и характер прочностных и деформационных свойств гидротермальных глинистых грунтов. Так, например, при одноосном раздавливании образцы гидротермальных глинистых грунтов, находящиеся в скрыто-текучем состоянии, разрушаются как хрупкопластичные тела, при этом прочность на одноосное сжатие может достигать 0,14 МПа. Как правило, с увеличением глубины показатели прочностных и деформационных свойств грунтов несколько увеличиваются, что напрямую связано со степенью преобразования, которая увеличивается вверх по разрезу гидротермальных глинистых грунтов.

Анализ полученных данных о составе, строении и свойствах позволяют охарактеризовать гидротермальные глинистые грунты как высокопористые

ультрадисперсные минеральные микро- и наносистемы, с преобладанием в них смешанного типа структурных связей.

Исследования проведены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV (Япония), растровый электронный микроскоп LEO 1450VP (Германия) и лазерный анализатор размера и заряда частиц Horiba SZ-100 (Япония)).

ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ МАССИВОВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

В.А. Королёв

МГУ имени М.В. Ломоносова (г.Москва, РФ), va-korolev@bk.ru

Аннотация. Охарактеризованы группы живых микро- и макроорганизмов-пелитофилов и пелитофитов, обитающих в глинистых грунтах. Показана их эколого-геологическая роль как биотического компонента эколого-геологических систем.

Ключевые слова: пелитофилы, пелитофиты, глинистые грунты, эколого-геологическая система

LIVING ORGANISMS OF CLAY SOILS MASSIVES

Korolev V.A.

Abstract. The groups of living micro- and macroorganisms-pelitophiles and pelitophytes living in clay soils are characterized. Their ecological-geological role as a biotic component of ecological-geological systems is shown.

Keywords: pelitophiles, pelitophytes, clay soils, ecological-geological system

Введение. В массивах глинистых грунтов, как многокомпонентных системах, обитают различные микро- и макроорганизмы: растения, растущие в (или на) глинистых грунтах, называемые *пелитофитами* (от греч. πηλός - «глина» и phyton - «растение»); а также микро- и макроорганизмы, живущие в глинах, или связанные с глинами, называемые *пелитофилами* (от греч. πηλός - «глина» и φίλια - «любовь»), т.е. «любящие глины» или «склонные к глинам». Они не только образуют биотическую составляющую грунта, но и являются *пелитобиоценозом* - компонентом эколого-геологической системы, формирующейся на массиве глинистых грунтов.

Микроорганизмы-пелитофилы. Взаимодействие различных микроорганизмов с глинистыми минералами, как с наиболее распространенной минеральной составляющей дисперсных грунтов, является фундаментальной основой их генезиса, геохимического преобразования и функционирования. Глинистые минералы существенно влияют на рост микробов и их биосинтетическую активность, облегчая потребление питательных веществ и обеспечивая защиту от неблагоприятных физико-химических условий. Но и микроорганизмы, в свою очередь, влияют на глинистые минералы, обуславливая изменение состава, строения, состояния и свойств глин в целом.

Микроорганизмы, включая бактерии, археи, цианобактерии, микроводоросли, а также свободноживущие и симбиотические грибы в ассоциации с частицами глин представляют

собой грунтовый или почвенный *микробоценоз*. Поскольку в глинах присутствует связанная вода, которая может удерживаться в порах и извлекаться из них, а также присутствовать в межслоевом пространстве набухающих глинистых минералов, последние рассматриваются как важные промежуточные звенья в обеспечении водой микробоценоза.

Микроорганизмы способны разрушать глинистые и алюмосиликатные минералы (силикатные бактерии), обуславливая биологическое выветривание. Способность силикатных бактерий «питаться» глинистыми минералами пока не подтвердилась. Однако другие микроскопические *пелитофилы*, такие как почвенные грибы и бактерии, растворяют многие глинистые алюмосиликаты: бентонит, биотит, мусковит и др., как это доказала Т.В.Аристовская. Их можно рассматривать как *пелитофагов*.

Разные виды бактерий по-разному влияют на один и тот же глинистый минерал. Один из обычных процессов, производимых микроорганизмами - высвобождение ионов K^+ из глинистых минералов. В экспериментах с аскомицетом *Aspergillus niger* регистрировали активное извлечение K^+ из биотита, мусковита и микроклина. Наиболее активно микробиологическое разрушение алюмосиликатов идет на территориях глиняных пустынь – такыров. Здесь большую роль играют диатомовые и сине-зеленые водоросли, которые подщелачивают среду и активно разрушают алюмосиликаты. Верхняя плотная корка такыров является сорбционным барьером, а нижележащий гипсовый горизонт – испарительным барьером.

Множество работ было посвящено исследованию процессов роста бактерий на различных глинистых минералах. Установлено, что бентонитовая глина и каолинит ингибируют рост сульфатредукторов *Desulfovibrio vulgaris* на 70- 90%. Зато цеолит не влияет на рост этих бактерий [2]. Глины с высоким содержанием алюминия тормозят рост и других бактерий: *Escherichia coli*, *Pseudomonas* sp. и других анаэробов, включая и клубеньковые бактерии.

В последние годы экспериментально был доказан прямой биосинтез глинистых минералов из растворов. Так, например, был изучен синтез каолинита в термальных источниках на Камчатке с температурой раствора 118°C, pH=2,5, где плотность сульфатобразующих микроорганизмов составляла 10^6 клеток/л. В пробах воды были обнаружены кристаллы каолинита почти идеальной формы, обладающие высокой степенью трехмерного порядка с содержанием до 40 когерентно рассеивающих слоев 1:1 [2].

Таким образом, можно уверенно считать, что микроорганизмы пелитофилы формируют с глинами специфические сообщества – симбиозы, в которых могут идти процессы и разложения глинистых минералов, и их формирования или преобразования одних в другие, а также образовываться глинистые осадки биогенного генезиса. Важным

выводом является и то, что бактерии только копируют реакции косного мира, не «изобретая» при этом ничего нового и лишь совершенствуя "технологии" производства. При этом косный мир всегда будет уступать бактериям в конкуренции за субстрат, так как скорость переработки субстрата у бактерий существенно выше. С этой точки зрения становится более ясной концепция экологической ниши бактерий пелитофилов: это повторение того или иного химического процесса в абиотическом мире, но с использованием органических каталитических инноваций. А сам бактериальный мир играет роль катализатора всего геохимического круговорота, связанного с глинистыми минералами [2,3].

Макроорганизмы-пелитофиты. Многие растения-пелитофиты приспособились к жизни на глинистых почвах и других глинистых грунтах. Среди них, также как и для прочих литофитов, выделяют облигатные растения – т.е. те, которые живут только на глинах, и факультативные растения – они могут расти как на глинистых, так и на прочих грунтах.

Пелитофиты существуют среди всех жизненных групп растений: травянистых, кустарниковых и древесных. Для корней пелитофитов характерно ослизнение, способствующее продвижению корней в плотных глинистых почвах и глинах. Корневые системы мощные, заглублённые с хорошо развитыми механическими тканями. Наиболее крупное деление пелитофитов, как и иных растений, проводится по их жизненным формам с выделением травянистых, кустарниковых и древесных растений, а также по их требовательности к влаге, освещенности, температуре и др. экологическим факторам.

Среди травянистых – это такие широко распространённые травы как звездчатка средняя или мокрица (*Stellaria media*), копытень европейский (*Asarum europaeum*), лебеда серая (*Atriplex cana*), осока просяная (*Carex panicea*), пузырник ломкий (*Cystopteris fragilis*) и другие, типичные для средней полосы; полынь белоземельная (*Arthemisia terrae-albae*), ежовник солончаковый или биюргун (*Anabasis salsa*), типичные для такыров и глиняных пустынь и др. Среди кустарниковых – это широко распространенные в средней полосе пелитофиты - малина (*Rubus idaeus*), смородина (*Ribes rubrum*) и др.

Среди древесных факультативных пелитофитов - такие широко распространенные виды хвойных, как ель (*Picea* sp.), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), можжевельник (*Juniperus* sp.), пихта (*Abies* sp.) и др. Среди лиственных – береза (*Betula* sp.), широко распространенная в лесных ландшафтах; ива (*Salix* sp.), предпочитающая влажные глинистые почвы и др. На территориях массивов, сложенных глинистыми и суглинистыми грунтами, формируются специфические *пелитофитоценозы*: сообщества растений, приуроченные к глинистым почвам подстилаемые глинистыми грунтами.

Макроорганизмы-пелитофилы. Существует множество макроорганизмов-пелитофилов, чья жизнь связана тем или иным образом с массивами глинистых грунтов. Их комплексы образуют *пелитозооценозы*.

В состав пелитозооценозов входят геобионты – обитатели глинистых почв, животные землерои, постоянно обитающие в глинистых грунтах, а также пелитофилы, использующие глинистые грунты как временное убежище или строительный материал для своих гнёзд. Среди многих животных также встречаются *пелитофаги* – организмы, поедающие глину. Пелитофилы встречаются среди всех типов и классов животных (*Animalia*). В типе **беспозвоночных** много видов пелитофилов выделяется среди кольчатых червей, моллюсков, нематод и членистоногих: насекомых, паукообразных и ракообразных.

Обнаружено большое число видов **насекомых**, «перерабатывающих» глину. Это и различные термиты, муравьи, роющие осы (*Sphacidae, Crabronidae*) и пчелы, шмели, жуки и др. Например, масштабы использования глин термитами (*Isoptera*) также поражают – некоторые термитники, построенные из частиц глин, склеенных слюной термитов, имеют высоту до восьми метров, а самый большой, обнаруженный в Африке, имел высоту 12,8 м. Недавно в Бразилии были обнаружены термитники возрастом до 4 тыс. лет, покрывающие огромную территорию: объем «переработанной» в них глины термитами составляет десятки кубических километров! [1].

Глины и глинистые илы активно «перерабатывают» **черви-илоеды** и многие **моллюски**, являющиеся пелитофагами. Один из самых крупных роющих моллюсков – гуидак (*Ranorea generosa*), двустворка, закапывающаяся в глинистый ил на глубину до 1 м, и набирающая вес до 1,5 кг и считающаяся самой долгоживущей, достигающей возраста ок. 150 лет. Среди **ракообразных** насчитывается также немало видов, роющих себе норы в глинистых грунтах. Это и обыкновенный рак, и сухопутные крабы, и др.

Встречается много видов **рыб**, которые при пересыхании водоёмов, в сухой период способны зарываться в глинистый ил и впадать в спячку. К ним относятся: лопастепёрые двоякодышащие рыбы - протоптеры (*Protopterus* sp.), способные в случае длительных засух прожить без воды до 4 лет; рогозуб (*Neoceratodus forsteri*), лепидосирен (*Lepidosiren paradoxa*) и др. В классе лучепёрых рыб выделяется род илистых прыгунов (*Periophthalmus*), населяющих мангровые леса, имеющих жаберное дыхание и ведущих земноводный образ жизни, зарываясь в глинистый ил.

Среди **пресмыкающихся** также насчитывается немало роющих животных, а также так или иначе связанных с глинистыми грунтами. Так, например, норы роют себе многие сухопутные черепахи. Крокодилы при пересыхании водоёмов зарываются глубоко в глинистый ил и впадают в спячку.

Среди *птиц* (*Aves*) есть множество видов, строящих свои гнезда в глинистых грунтах, а также таких, которые используют глины для строительства своих гнезд вне земли. Среди них, например, ласточки, птицы-печники (рода *Furnarius*), скалистые поползны, сорочки жаворонки и др. Особенно сложная «архитектура» гнезд отмечена у птиц-печников, которые каркас гнезда делают из различных растительных материалов, а затем обмазывают его глиной. Вес некоторых глиняных гнезд печников составляет 3,5-4 кг [1].

Среди *млекопитающих* пелитофилов выделяются цокоры, способные строить норы в плотных глинистых грунтах. Однако большинство роющих млекопитающих, таких как кроты, суслики, сурки, кролики, лисы, песцы, барсуки и др. стараются избегать глин, т.к. они держат влагу и в них труднее рыть норы из-за их высокой плотности. Поэтому они предпочитают супесчаные или песчаные грунты. Бобры используют глину, обмазывая ею свои хатки куполообразной формы, превращая их в прочные сооружения. Внутри купола устраивается обширная камера для семьи, стенки которой тщательно обмазаны глиной.

Однако глина используется млекопитающими не только как среда обитания. Многие животные, а также человек, склонны к литофагии, точнее – к *пелитофагии* – потреблению глины. Пелитофагия широко распространена среди многих видов копытных животных – маралов (*Cervus elaphus*), быков-гауров (*Bos gaurus*) и др.

Заключение. Таким образом, биотическая составляющая глинистых грунтов весьма разнообразна и является их неотъемлемой частью. Она играет важную роль в формировании химико-минерального состава глин, их строения и свойств. При этом осуществляется взаимное влияние (взаимодействие) биоты и глинистых минералов.

Литература

1. Королев В.А. Экологическая роль глин и глинистых минералов. – Инженерная геология, 2019. Том XIV, № 1, - с. 60-71.
2. Наймарк Е.Б., Ероцев-Шак В.А., Чижикова Н.П. Взаимодействие глинистых минералов с микроорганизмами: обзор экспериментальных данных. – Журнал общей биологии. 2009. Том 70, № 2, - с. 155-167.
3. Fomina M., Skorochood I. Microbial Interaction with Clay Minerals and Its nvironmental and Biotechnological Implications. – Minerals, 2020, 10, 861; doi:10.3390/min10100861

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРОЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ

М.С. Чернов, В.Н. Соколов, О.В. Разгулина

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический
факультет, chernov@geol.msu.ru*

Интерес к исследованию микростроения прослеживается на протяжении всей истории развития грунтоведения. Изучение микростроения глинистых грунтов имеет особое значение для познания и объяснения их свойств. Это связано с чрезвычайно малым размером и высокой физико-химической активностью структурных элементов таких грунтов. Изучению глинистых грунтов в различных аспектах посвящены работы многих советских и зарубежных исследователей. Несмотря на достигнутые успехи, все еще существует много неясных вопросов, связанных с особенностями поведения глинистых грунтов. Для изучения микростроения требуется применение специальных методов. Наиболее комплексную оценку ее морфометрических и геометрических признаков дают такие прямые методы исследования, как оптическая и электронная микроскопия. Однако, оптические микроскопы не обладают достаточной разрешающей способностью, из-за этого не позволяют исследовать образцы при больших увеличениях и увидеть реальное микростроение глинистых грунтов. Большой прогресс произошел после внедрения в практику грунтоведения растровой электронной микроскопии (РЭМ), что обеспечило возможность наблюдать микрорельеф поверхности образцов при больших увеличениях, с разрешающей способностью в первые нанометры. Следующим большим шагом в области изучения строения глинистых грунтов стала разработка специализированного программного обеспечения (ПО) для количественного анализа микроструктуры грунтов, таких как ПО «СТИМАН» [1]. Данное ПО позволило учитывать полидисперсность грунтов с помощью анализа серии разномасштабных изображений. Использование такого анализа позволило оценивать структурные элементы в широком диапазоне от <0.1 мкм до 10-100 мкм. С момента начала изучения микростроения глинистых грунтов был накоплен огромный опыт в его изучении, разработаны методы количественного анализа и классифицирования микростроения, было показано влияние микростроения на деформационное поведение глинистых грунтов.

В последнее десятилетие активно развивается неразрушающий метод исследования строения – компьютерная рентгеновская микротомография (μ КТ). Данный метод позволяет получить информацию о внутреннем строении (микростроении) грунтов в естественном состоянии, не разрушая их. Среди преимуществ данного метода при изучении геологических

объектов на первый план выходят оперативность исследований, высокая информативность, получаемых данных, минимизация влияния человеческого фактора на результаты, а также возможность проведение исследований без дополнительной пробоподготовки при естественном состоянии слагающих фаз. Однако у данного метода имеется ряд ограничений, наиболее существенные: малый размер образца при съемки в высоком разрешении; недостаточное предельное разрешение получаемых данных (1-0,5 мкм), которого недостаточно для получения полной информации о строении высокодисперсных глинистых грунтов; а так же длительное время съемки от 30-40 минут до нескольких часов. Последнее делает невозможным съемку и изучение динамично изменяющихся систем, например, фильтрацию флюида через образец, деформирование образца под нагрузкой и др. Тем не менее, попытки изучить и описать процессы, возникающие в образцах при механических воздействиях, непрестанно совершаются и совершенствуются вместе с техникой. При этом многие исследователи сочетают результаты томографии с другими методами. Все чаще проводится совместное использование методов μ КТ и РЭМ или оптической микроскопии.

Авторский коллектив в 2014 году предложил новую методику изучения строения образца, позволяющую учесть, особенности строения грунта как на микро, так и на макро уровне [2]. Макростроение исследуется с помощью μ КТ при увеличениях от 5 до 100 крат. При этом изучаются представительные образцы (размером до $4 \times 4 \times 8$ см³). В результате анализа образца с помощью μ КТ получают количественные данные о крупных структурных элементах (0,1–10 мм) и намечаются участки с более однородным тонкодисперсным микростроением, которые затем исследуются с помощью РЭМ. Количественный анализ проводится с помощью ПО «СТИМАН», которое позволяет объединять результаты, полученные с помощью РЭМ и μ КТ, и проводить анализ по суммарному массиву данных. Таким образом, в ходе исследования могут быть получены количественные данные о всем строении образца, включающем, как макро-, так и микроструктурные элементы.

Применение данной методики позволяет значительно повысить достоверность исследований строения глинистых грунтов в широком диапазоне размеров структурных элементов: от нескольких сантиметров, до десятков нанометров. Результаты исследований строения глинистых грунтов различного генезиса с использованием предложенной методики уже докладывались на данной конференции в прошлые годы. Данный доклад посвящен результатам изучения изменения строения образцов глинистых грунтов при нарастании сжимающей нагрузки.

С целью наиболее полного описания строения глинистых грунтов была использована специальная методика, в рамках которой компрессионным испытаниям подвергался образец

сравнительно малых размеров, строение которого возможно достаточно детально описать, совмещая результаты растровой электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии. В результате может быть получена информация о строении образцов на различных стадиях деформирования при компрессионных испытаниях. Исследования были выполнены на модельных «образцах-близнецах», с контролем влажности и плотности скелета грунта при изготовлении.

Исследования показали, что в модельных образцах тяжелого суглинка при компрессионных испытаниях поры различных категорий в процессе сжатия не закрываются монотонно, а имеют различную скорость и порядок закрытия. Помимо отжатия воды из образца, в процессе компрессионного сжатия происходит перераспределение порового пространства. Даже при отсутствии существенной деформации в процессе нагружения в строении образца, тем не менее, происходит перераспределение вклада пор различных категорий в общую пористость, которое может быть значительнее, чем сокращение общей пористости. Также было установлено, что в образце под действием нагрузки в первую очередь происходит смещение относительно крупных (до 1 мм) структурных элементов, представленных мелкими «блоками» (агрегатами) глинистого материала и включениями неглинистых минералов песчаной и пылеватой размерности. Одновременно с этим происходит закрытие наиболее крупных пор в образце, и только после завершения этого процесса происходит деформирование остального объема образца.

Так же с применением описанной выше методики были проведены экспериментальные исследования изменения параметров строения моренных глинистых грунтов природного сложения при деформировании, при одноосном и трехосном сжатии.

Отличительной особенностью моренных грунтов является большая неоднородность материала и высокое содержание в глинистой массе обломков минералов и пород различного размера. По данным КТ в результате одноосного деформирования вертикально ориентированные крупные включения стремятся приобрести ориентировку, более близкую к горизонтальной. При этом в ходе деформирования происходит закрытие первичных макропор, а также формирование микротрещин. На микроуровне (по данным РЭМ) поровое пространство как природных, так и деформируемых грунтов представлено изометричными округлыми и эллипсовидными межзернистыми, межмикроагрегатными и межмикроагрегатно-зернистыми порами неправильной формы. При деформировании в образцах формируются микротрещины протяженностью более 100-120 мкм в результате увеличения и слияния первичных микротрещин вокруг песчано-гравийных обломков минералов и пород.

При трехосном деформировании образцов моренных глинистых грунтов уже на

макроуровне заметно изменение положения отдельных крупных включений на стадии предварительной консолидации, однако основная переориентировка структурных элементов происходит непосредственно на стадии нагружения. При этом грунты приобретают форму «бочки», но видимых невооруженным глазом зон смещения не наблюдается. В процессе деформирования происходит постепенное уменьшение порового пространства грунтов. Также в результате деформирования грунта формируются отдельные зоны горизонтально ориентированных структурных элементов (зерен, включений). Кроме того, первичные трещины, сконцентрированные вокруг крупных обломков включений, могут закрываться. Это происходит преимущественно на стадии консолидации грунта. На микроуровне можно заметить, что после проведения испытания микроструктура грунта становится более плотной и ориентированной. В строении грунта заметно большее количество скоплений микроагрегатов глинистых частиц.

В ходе проведения испытания происходит образование микротрещин протяженностью до 50 мкм, многие из которых формируются за счет слияния микротрещин вокруг включений. Эти микротрещины, в процессе деформирования соединяются друг с другом, при этом образуя зоны смещения грунта протяженностью 1,5-2,0 мм и более. Также после проведения испытания на трехосное сжатие между близко расположенными зернами кварца под воздействием сжимающих усилий формируются уплотненные прослойки ориентированных скоплений глинистых микроагрегатов, увеличивающих общую прочность грунта.

Количественный анализ строения образцов моренных глинистых грунтов при трехосных испытаниях показал, что в процессе деформирования происходит существенное уменьшение (более чем в 10 раз) вклада макропор (с эквивалентным диаметром > 100 мкм) и увеличение вклада крупных (10-100 мкм) и мелких (1-10 мкм) микропор (в 1,3-1,4 раза) в общую пористость грунта. При этом вклад ультрамикропор ($< 0,1$ мкм) и тонких микропор (0,1-1 мкм) практически не меняется, но уменьшается коэффициент формы ультрамикропор, то есть форма таких пор становятся более вытянутой, при этом до конца они не смыкаются. Этот факт указывает на то, что в процессе трехосного сжатия моренных суглинков в образце деформируются все структурные элементы, сложенные глинистыми частицами, включая и мельчайшие ультрамикроагрегаты. Также отмечается, что в ходе деформирования макропоры, крупные и тонкие микропоры приобретают более округлую изометричную форму.

Описанные в работе методы и результаты исследования строения глинистых грунтов, выполнены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (комплекс испытательного оборудования

АСИС, растровый электронный микроскоп LEO 1450VP (Германия) и рентгеновский компьютерный томограф Yamato TDM 1000H-II (Япония)).

Литература

1. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Исследование микроструктуры грунтов с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений. // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 4. С. 1-6.
2. Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Чернов М.С., Разгулина О.В., Юрковец Д.И. Анализ структуры грунтов комплексом растровый электронный микроскоп - рентгеновский компьютерный микротомограф (РЭМ-μКТ). // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 5. С. 457–463.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ШВЕНТОЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ (D₃жv) И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Е.Н. Самарин¹, И.В. Аверин², М.С. Чернов¹, О.В. Зеркаль¹, Е.В. Щепетова³

1 - МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, РФ), 2 - ООО «Инженерная геология» (г. Москва, РФ); 3 - Геологический институт РАН (г. Москва, РФ)

Аннотация. Детальное исследование состава и структурно-текстурных особенностей верхнедевонских песчаников, слагающих основной массив грунтов, к которому приурочены основные подземные сооружения Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, позволило установить их уникальные свойства. Слабая суффозионная устойчивость пород на фоне специфических палеогеографических условий обусловила возникновение уникального природного явления.

Ключевые слова: Монастырь, олигомиктовые песчаники, пленочные контакты между частицами, суффозионный размыв, мышьяк, антисептические свойства.

FEATURES OF THE COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF SANDSTONES OF THE SHVENTOYSKAY SUITE AND THEIR PRACTICAL SIGNIFICANCE

Abstract. A detailed study of the composition and structural and textural features of the Upper Devonian sandstones, which make up the main soil mass, to which the main underground structures of the Holy Dormition Pskov-Pechersk Monastery are confined, allowed us to establish their unique properties. The weak suffusion stability of sandstones mentioned against the background of specific paleogeographic conditions caused the emergence of a unique natural phenomenon.

Keywords: Monastery, oligomictic sandstones, film contacts between sand particles, suffusion erosion, arsenic, antiseptic properties.

Введение. Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь – один из самых крупных и известных в России мужских монастырей с многовековой историей. Название монастыря связано с находящимися в нём пещерами, называемыми «Богом зданными» (созданными Богом). Главной особенностью пещер является сильное подавление процессов гниения, вследствие чего останки после захоронения сохраняются нетленными в течение нескольких сотен лет. По преданию, пещеры стали известны местным жителям в 1392 году. В пещерах селились монахи, бежавшие в псковскую землю с юга, от набегов крымских татар. В 1473 году здесь была освящена пещерная церковь Успения Божией Матери, выкопанная преподобным Ионой в холме из песчаника. Этот

год считается годом основания монастыря. Холм, в котором находятся Успенская церковь и «Богом зданные» пещеры, называется Святой горой (рис.1).

Такое природное образование, приобретшее исключительное социальное значение, является результатом специфических литологических особенностей состава песчаников и совокупного воздействия эрозионных процессов, действовавших в позднем неоплейстоцене – голоцене, в результате чего массив песчаников оказался на поверхности.



*Рис. 1. Схема Псково-Печерского монастыря:
1 – Святая Горка с пещерным комплексом – Успенский пещерный храм;
2 – Никольская церковь;
3 – насыпной холм;
4 – Собор Архангела Михаила*

Геоморфология и история формирования рельефа. В дочетвертичное время основной формой рельефа территории расположения монастыря являлось широкое Девонское плато, приуроченное к выходу на поверхность наиболее устойчивых пород – песчаников швентойского горизонта (D_{35v}) франкского яруса. В период наступления валдайского ледника в западной части территории формируется эрозионная флювиогляциальная палеоложбина, которая в последствии заполняется песчано-глыбовым материалом. Простираение ложбины – северо – северо-восток, азимут около 5-10⁰; правый борт ложбины зафиксирован на участке расположения Собора Архангела Михаила и западнее Успенского подземного храма, левый борт расположен западнее монастырской территории. На этой же стадии, видимо, под воздействием прирусловых водных потоков, в этом же борту палеоложбины в результате эрозионных и суффозионных процессов происходит формирование пещер, часть из которых сохранилась до настоящего времени.

Следующий этап приурочен к верхневалдайскому стадияльному горизонту и связан с наступлением ледника и последующим образованием холмисто-моренного рельефа в заключительной фазе валдайского оледенения. Местность приобрела пересеченный характер, представляя собой чередование отдельных холмов или их цепочек и понижений между ними. В

пределах исследуемой территории морена повсеместно перекрыла коренные девонские породы, а также флювиогляциальные отложения, сформированные на ранних этапах валдайского оледенения, либо до его наступления.

В голоцене под воздействием эрозионной деятельности р. Пачковка формируется флювиальный тип рельефа, происходит образование овражно-балочной сети практически в ее современном виде. Формирование оврага, расположенного вкост палеоложбины, привело к обнажению ее сечения и прирусловых пещерных образований в швентойских песчаниках, согласно преданию, и давших начало монашеской жизни. Существующий уровень нижней части оврага – искусственный, образован за счет заключения ручья Каменец в коллектор и подъем природного уровня тальвега оврага на высоту от 1,7 м у башни Верхних решеток (южная граница) до 3,5 м у башни Нижних решеток (Северная граница). Абсолютные высотные отметки рельефа в пределах исследуемой площадки составляют 67,10 – 91,25 м.

Территория монастыря сложена терригенными породами швентойского горизонта ($D_{3\check{s}v}$), перекрытых флювиогляциальными ($fg Q_{III}^v$) и гляциальными ($g Q_{III}^v$) отложениями валдайского оледенения. С поверхности на склонах и за пределами оврага залегают насыпные (tQ_{IV}), делювиальные (dQ_{IV}) и делювиально-оползневые ($d, dp Q_{IV}$) отложения. В тальвеге оврага под насыпными грунтами залегают современные аллювиальные отложения ($a Q_{IV}$).

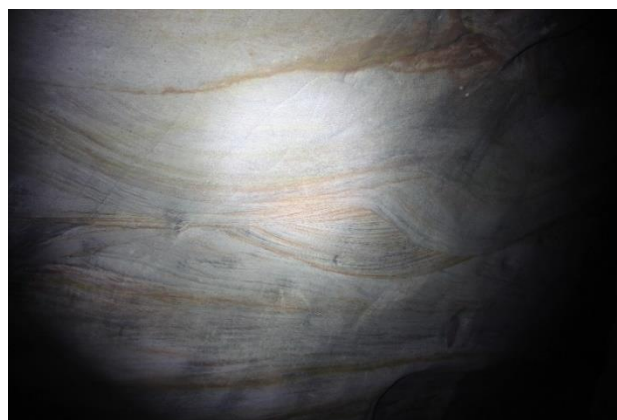


Рис. 2. Слоистость в песчаниках швентойского горизонта ($D_{3\check{s}v}$): левое фото – обнажение в правом борту р. Пачковка, правое фото – в хозяйственной пещере монастыря

Отложения швентойского горизонта ($D_{3\check{s}v}$) вскрыты на глубине 3,1 – 13,0 м в верхней части оврага (за бровками склонов) и 2,7 – 5,0 м в его тальвеге (абс. отм 65,20 – 83,10м), и представлены переслаиванием песчаников и глин.

Песчаники от светло-розовых до красновато-коричневых, мелкозернистые алевроитистые, с линзовидной и перекрестной слоистостью, с частыми прослоями маломощных глин, слабосцементированные, маловлажные (рис. 2). Характеристика структуры – в табл. 1.

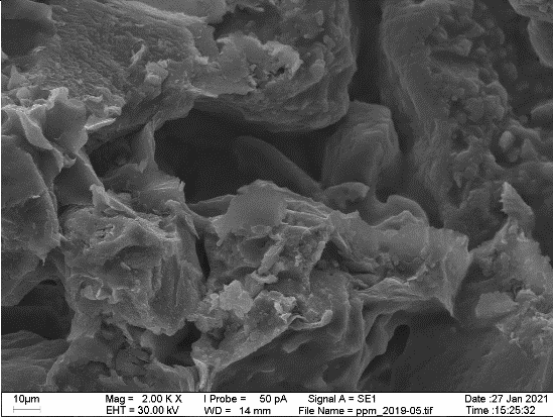
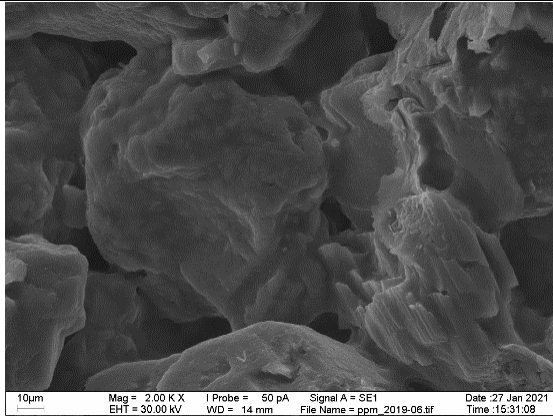
Структура мелкозернистых песчаников швентойского горизонта (D₃šv)

		
Алевропесчаник (песчаник мелкозернистый алевритовый) олигомиктовый кварцевый, слюдястый. Общий вид. Николи-	Несплошной контурный железистый (железисто-доломитовый?) цемент в песчанике. Николи-	Несплошной контурный железистый (железисто-доломитовый?) цемент в песчанике. Николи+

Среди обломков: кварц – 75-80%; обломки кварцитов – 5-10%; полевые шпаты (в основном, КПШ) – 10-15%. Слюды (чешуйки длиной до 0.2 мм) бесцветные и темно-зеленые в соотношении 1: 3, последние частично деградированные или окисленные с поверхности (в железистых «рубашках») – около 5 %. Присутствуют непрозрачные акцессорные рудные минералы (< 1%) и ед. очень мелкие фрагменты обугленного растительного детрита.

Таблица 2

Микростроение песчаников швентойского горизонта (D₃šv)

	
Хорошо просматривается поверхностная пленка и точечные контакты между зернами. Пленка - глинисто-силикатная, глинистая составляющая скорее всего каолинит-гидрослюдистая	По кадру выполнен химический анализ микрозондом. В центре - кварцевое зерно с железисто-глинистой пленкой. Справа внизу – выщелоченное разложившееся зерно КПШ

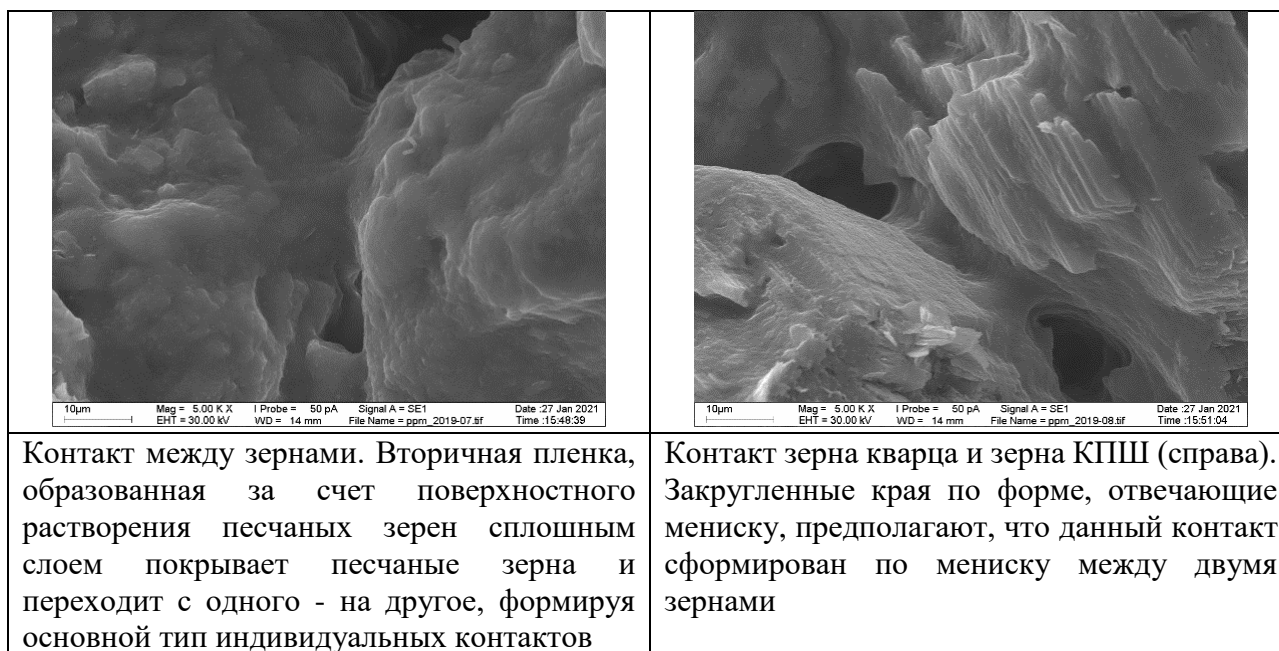
Электронно-микроскопические исследования позволили установить (табл. 2), что песчаные зерна кварца и полевого шпата сильно деградированы, имеют неправильную форму, покрыты вторичной пленкой.

Формирование контактов между зернами (табл. 3) произошло либо за счет слияния

отдельных пленок алюмосиликатно-железистого геля, либо за счет высыхания капиллярных менисков пересыщенного порового раствора.

Таблица 3

Микростроение песчаников швентойского горизонта (D₃šv)



По-видимому, формирование цемента произошло за счет перманентного замачивания – высыхания породы в приповерхностных условиях под действием слабощелочных грунтовых вод, что привело к формированию цементированной, но неустойчивой к суффозионным процессам породе, легко размываемой даже при незначительном повышении гидравлического градиента подземного потока.

Инженерно-геологические свойства песчаников: плотность частиц грунта – 2,66 г/см³, плотность грунта – 1,74 г/см³, влажность – 3,0 %, коэффициент пористости – 0,57, степень влажности – 0,13, угол внутреннего трения – 32°, сцепление – 10 кПа, модуль общей деформации 38 МПа. То есть песчаники являются очень слабыми грунтами, и практически легко растираются руками, тем не менее способны удерживать стенки пещер на глубине до 20 м с высотой 2,0 – 4,0 м.

Исследование химического состава швентойских отложений позволило установить, что песчаники характеризуются высоким содержанием мышьяка, которое составляет 130-150 ppm (установлено параллельно рентгенофлуорисцентным и атомно-адсорбционным методами).

Таким образом, высокое содержание мышьяка, малая влажность, поддержанию которой способствует наличие хорошего верхнего водоупора, мощностью до 8,0 м, роль которого выполняют моренные суглинки (g Q_ш^v), пониженная температура и замедленный газообмен с атмосферой и сформировали уникальные природные условия «Святой горы».

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ ПЕРЕМЕЩЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ЛИТОГЕНЕЗЕ

Н.В. Абакумова, С.К. Николаева, Е.Н. Самарин

Формирование массивов техногенных грунтов в условиях современного развития городских территорий происходит стремительными темпами. Если в 1939 году территория Москвы составляла 326,2 км², то на момент 2019 года ее площадь достигла 2561,5 км² [3]. Жилая застройка затронула территории, которые ранее находились далеко от городской черты и десятилетиями использовались для складирования твердых бытовых отходов, грунтов из строительных котлованов и тоннелей метрополитена, отходов промышленных предприятий и т.п. Со временем массивы насыпных грунтов стали чаще попадать в сферу хозяйственных интересов.

Процесс образования наиболее молодых отложений, связанных с инженерно-хозяйственной деятельностью человека, процесс нового породообразования и переработки человеком пород земной коры был впервые назван Ф.В. Котловым *антропогенным литогенезом* [1]. При этом антропогенный литогенез бывает стихийным и целенаправленным. Ф.В. Котлов выделял три стадии этого процесса:

- 1) разрушение и изменение пород;
- 2) перемещение пород;
- 3) новое породообразование.

В данной статье идет речь именно о перемещенных дисперсных грунтах, которые были изъятые из природных массивов, перемещены и уложены тем или иным способом. Теперь массивы перемещенных природных грунтов вторично подвергаются процессам слеживания, уплотнения, в них вновь формируются разрушенные ранее структурные связи.

Целью исследования стало выявление изменений в составе, строении и свойствах природных грунтов при их перемещении в насыпи. Объектами исследования стали грунты на территории г. Москвы (табл. 1):

- стихийно образованных насыпей – отвалов из строительных котлованов;
- целенаправленно возведенных насыпей – железнодорожной и образованных при планировке территории.

При нарушении естественного залегания грунтов с ними происходят изменения, затрагивающие как состав грунтов и их строение, так и свойства.

Сведения о массивах исследуемых грунтов

Участок	Исходный грунт	Мощность, м	Возраст техногенных отложений, лет
№ 1, мкр. Братцево	Покровные отложения eQ _{III-IV}	0,5-7,0	>20
№ 2, ул. Озерная	Моренные отложения gQ _{II}	1,9-18,8	>40
№ 3, р-н Москва-Сити*	Аллювиальные пески aQ _{III}	1,4-3,4	>20
№ 4, территория Курского вокзала*	Флювиогляциальные пески fgQ _{II}	3,0-12,0	>20

Примечание: * – по данным инженерно-геологических изысканий.

Изменение состава и строение

В первую очередь изменение претерпевает крупнообломочная часть грунтов: в ходе перемещения в грунт «падают» обломки бетона, кирпича, асфальта, уголь, древесина, стекло и др. Так, в перемещенных менее чем на 200 м, покровных отложениях на участке № 1 количество обломков >1 мм увеличилось с 0,16-0,28 до 1,1-25 %.

При этом крупные обломки способны разрушаться до мелкопесчаной фракции. На рис. 1 представлены фракции образцов, отобранных на участке № 2. Крупнообломочный материал представлен как обломками магматических пород, находившихся в исходных моренных отложениях, так и техногенной частью.

Привнесенное в процессе перемещения грунта органическое вещество часто располагается в грунте в виде локальных участков, гнезд и линз, образующимся за счет попадания в грунт бытового мусора. Оно мало рассеивается по дисперсной части, поэтому при определении методом мокрого сжигания по Тюрину на участках № 1 и № 2 содержание $C_{орг}$ составило всего 0,15-1,62 %, что обусловлено содержанием органики еще в природном грунте за счет формирования почвенного слоя, остатков корней растений и пр.; причем уже при значении 1,3-1,4 % в грунтах могут начинаться процессы биогазообразования [2].

При перемещении природных грунтов нарушается естественное строение массива, а возведенная насыпь в зависимости от характера и цели отсыпки может иметь горизонтальную слоистую структуру (участок № 4), может быть отсыпана по откосу (участок № 2), может иметь хаотичную структуру (участки № 1 и № 3) и т.д. Например, на участке № 2 при бурении на глубинах порядка 10 м неоднократно были встречены пустоты размером до 1,5 м между крупными бетонными плитами, погребенными остатками сооружений.

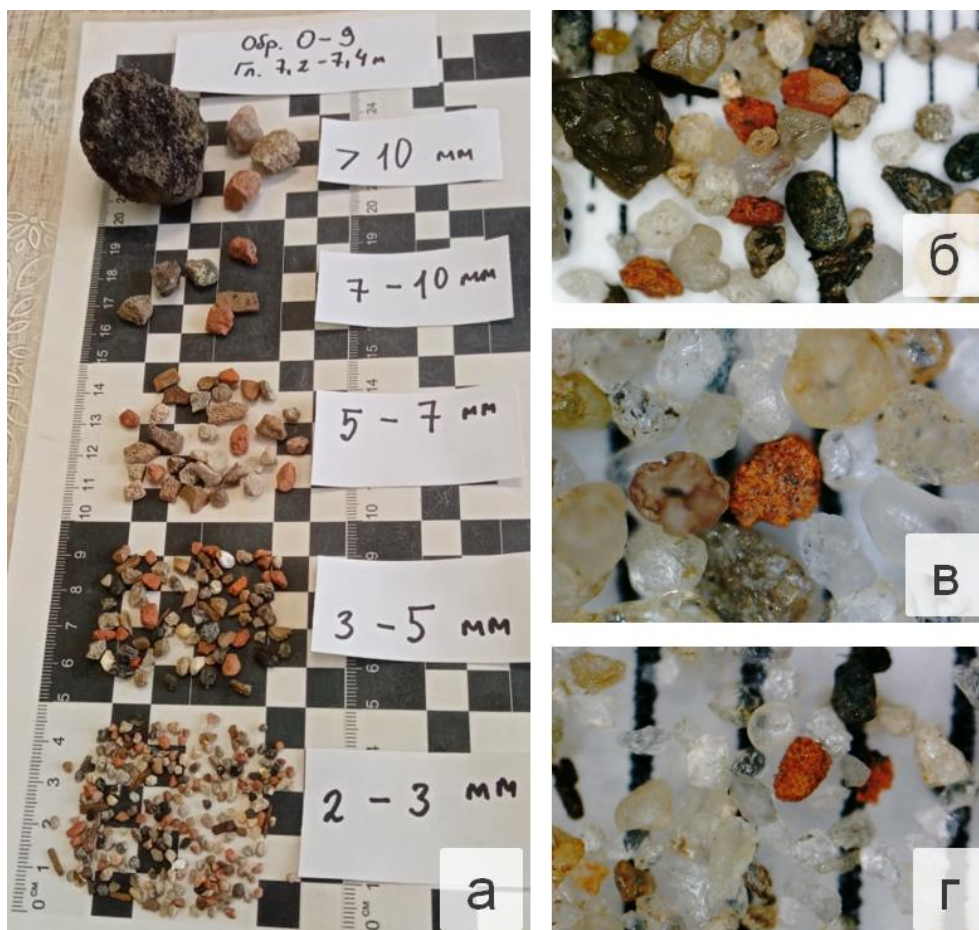


Рис. 1. Гранулометрические фракции образца супеси с участка № 2: а – крупнообломочная часть; б – 0,5-2 мм; в – 0,25-0,5 мм; г – 0,10-0,25 мм (фото Абакумовой Н.В.)

Микростроение перемещенных грунтов также претерпевает изменения. При изучении сколов образцов глинистых грунтов с помощью растрового электронного микроскопа отчетливо прослеживаются трещины между агрегатами.

Изменение свойств

Перемещение природных грунтов, как правило, приводит либо к улучшению свойств грунтов, либо к их ухудшению, при этом любой исход может ждать как стихийно накопленную насыпь, так и целенаправленно возведенную.

В большинстве случаев точное определение места изъятия природного материала, из которого сложены насыпи, затруднено, поэтому для сравнения в табл. 2 приведены нормативные показатели физико-механических свойств грунтов при соответствующем значении коэффициента пористости.

Среди исследуемых насыпных грунтов наблюдались более высокие значения плотности скелета и показателей прочностных и деформационных свойств по сравнению с нормативными на участках № 1 и № 4. На первом участке грунт, вероятно, специально

уплотнялся с целью дальнейшего использования в качестве основания, а на четвертом участке грунт укладывался с заданными плотностью и влажностью, впоследствии в течение продолжительного времени подвергался вибрациям и уплотнению от железнодорожного транспорта.

Таблица 2

Некоторые показатели физических и физико-механических свойств техногенных переотложенных грунтов и нормативные значения для исходных природных грунтов

Грунт	Название	We, %	ρ_d г/см ³	e, ед.	ϕ , град.	C, МПа	E, МПа
Участок № 1 Грунты строительного отвала, tQ _{IV}	Суглинок	15	1,85	0,44	13	0,112	5,3* 8,6**
Покровные отложения eQ _{III-IV}	Суглинок	19	1,73	0,54	9	0,035	3,8* 5,0**
Участок № 2 Грунты строительного отвала, с бытовыми и строительными отходами, tQ _{IV}	Суглинок мягкопластичный	17	1,38	1,00	-	-	-
Моренные отложения gQ _{II}	Суглинок	-	-	1,00	13	0,013	18,7
Участок № 3 Грунты планировки территории, tQ _{IV}	Песок средней крупности	16	1,62	0,64	31	0,001	31,0
Аллювиальные пески aQ _{III}	Песок средней крупности	-	-	0,64	35	0,001	44,4
Участок № 4 Грунты железнодорожной насыпи, tQ _{IV}	Песок средней крупности	10	1,66	0,6	36	0,003	35,0
Флювиогляциальные пески fgQ _{II}	Песок средней крупности	-	-	0,6	37	0,002	

Примечание: * - модуль общей деформации в интервале нагрузок 0,05-0,3 МПа,

** - модуль общей деформации в интервале нагрузок 0,3-0,5 МПа.

Таким образом, техногенное перемещение грунтов приводит к изменениям в их составе, строении и свойствах, что может негативно сказаться на возведенных на них зданиях и сооружениях при недостаточном изучении и формальном подходе. Прослеживается заметное отличие физико-механических характеристик грунтов насыпей, «отсыпанных» грунтами четвертичного возраста, от нормативных значений, приведенных в СП 22.13330.2016, что еще раз подтверждает необходимость разработки специальных методик исследования и нормативных документов применительно к техногенным грунтам.

Литература

1. Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Недра, 1978, 263 с.
2. Викторова М.А. Грунты несанкционированных строительных отвалов и свалок (на примере территории г. Москвы). Автореф. на соиск. уч. степени канд. геол.-минер. наук. М., МГУ, 2007.

Интернет-источники

3. Статистика России и мира – информация и показатели <https://rosinfostat.ru/ploshhad-moskvy/> (дата обращения 07.04.2021).

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТОЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Памяти Л.Л. Панасьян посвящается

Э.В. Калинин

Массивы горных пород постоянно находятся в напряженно-деформированном состоянии (НДС), которое очень быстро меняется под воздействием разнообразных природных и искусственных факторов. Изучение НДС горных пород и его изменения под влиянием различных причин представляет собой важную инженерно-геологическую задачу. Для исследования НДС применяются полевые методы – разгрузки, восстановления, гидроразрыва, разнообразные методы математического моделирования, а также лабораторные способы. Возможно применение метода, основанного на использовании акустоэмиссионного эффекта памяти, разработанного на кафедре инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ старшим научным сотрудником Л.Л. Панасьян.

Акустической эмиссией (АЭ) называется процесс излучения упругих волн малых энергий, возникающий в результате необратимых или частично обратимых изменений структуры твердых тел под влиянием внешних и внутренних факторов различной физической природы. Свойство акустической эмиссии нести информацию о развитии дефектов в материале широко используется в целях неразрушающего контроля в промышленности. В породах АЭ возникает при силовом и температурном воздействии и сопровождает процесс образования микротрещин, дилатансии, ползучести и др. [1].

Способность к сохранению и, при определенных условиях, воспроизведению информации об испытанных природно-генетических и техногенных воздействиях является одной из наиболее общих качественных особенностей горных пород и потому может рассматриваться как их фундаментальное свойство. Конкретные проявления этого свойства получили названия эффектов памяти. Они заключаются в особенностях откликов горных пород, связанных с предысторией испытанных воздействий, на динамику различных тестовых физических полей [4].

Акустоэмиссионный эффект памяти является в настоящее время одним из наиболее изученных эффектов памяти в горных породах. Впервые эффект памяти был установлен Й. Кайзером (Мюнхенская высшая техническая школа, 1953 г.) для металлов и состоял в невозпроизводимости АЭ при повторном нагружении до тех пор, пока величина текущей нагрузки не достигала максимума предыдущей нагрузки. Кайзер зарегистрировал эффект,

впоследствии названный его именем, в экспериментах по одноосному сжатию.

Акустоэмиссионный эффект памяти наблюдается при циклическом нагружении горных пород с возрастающей от цикла к циклу нагрузкой [2]. Эффект заключается в невоспроизводимости АЭ вплоть до максимального напряжения предшествующего цикла, когда параметры АЭ скачкообразно восстанавливаются до уровня, соответствующего максимальному напряжению. Таким образом, чтобы получить рост АЭ необходимо увеличивать напряжение от цикла к циклу и «превзойти» предыдущую нагрузку.

Изучение величин напряжений, в котором находятся массивы пород в естественных условиях, с использованием акустоэмиссионного эффекта памяти было осуществлено на Коробковском железорудном месторождении, входящего в состав КМА [3]. С этой целью АО «Комбинат КМАруда» были предоставлены образцы железистых кварцитов, отобранных из верхней железорудной подсветы (PR_{1kr3}) из шести интервалов, равномерно распределенных по глубине вертикальной скважины глубиной 150 м (рис. 1), пройденной в 2017 г.

Для изучения акустоэмиссионного эффекта памяти образцы подвергались одноосному сжатию с одновременной регистрацией АЭ, для чего использовались пресс ЦДМ-10 и система акустоэмиссионного контроля СДС 1008. Системный блок подключается через USB-порт к ПК; также к системному блоку подключается металлокерамический пьезоэлектрический датчик через предусилитель сигнала АЭ. Принцип работы аппаратуры заключается в преобразовании акустического сигнала (регистрируемой упругой волны) в электрический сигнал, который подается на предусилитель и затем поступает на вход платы канала акустической эмиссии.

Образцы нагружались с постоянной скоростью 300 кг/мин. Усилие на образец подавалось с помощью прессы в ручном режиме управления. В течение опыта с постоянной скоростью происходит регистрация параметров АЭ, к которым относятся: счёт АЭ (ΣN), время наступления события (импульса) и сумма импульсов (Σi), а также амплитуда и энергия сигналов. При обработке данных использовалось программное обеспечение фирмы «СДС» – Маэстро 1.2.2. По результатам исследований проявления акустоэмиссионного эффекта памяти строятся графики зависимости суммарного счета (ΣN), суммарного количества импульсов (Σi), а также параметра R от напряжения (σ , МПа), по которым выполняется восстановление напряжений. Для каждого образца выбирается наиболее показательный график, из которого можно извлечь максимальное количество информации.

Так график зависимости суммарного количества импульсов (Σi) от напряжения (σ , МПа) оказался наиболее показательным для образца из I-го интервала. Графики суммарного счета (ΣN) от напряжения (σ , МПа) использовались для восстановления напряжений в

образцах из интервалов II, III и V. Графики зависимости параметра R от напряжения (σ , МПа) применялись для интервалов IV и VI. На всех образцах было диагностировано проявление акустоэмиссионного эффекта памяти по перегибам графиков зависимости суммарного счета (ΣN) или суммарного количества импульсов (Σi) от напряжения (σ , МПа) или по наибольшим значениям параметра R.

Например, для образца из интервала I (-130 – -130,5 м) по перегибам графика зависимости суммарного количества импульсов (Σi) от напряжения (σ , МПа), определены 2 напряжения: 8,14 МПа и 62,54 МПа (рис. 1).

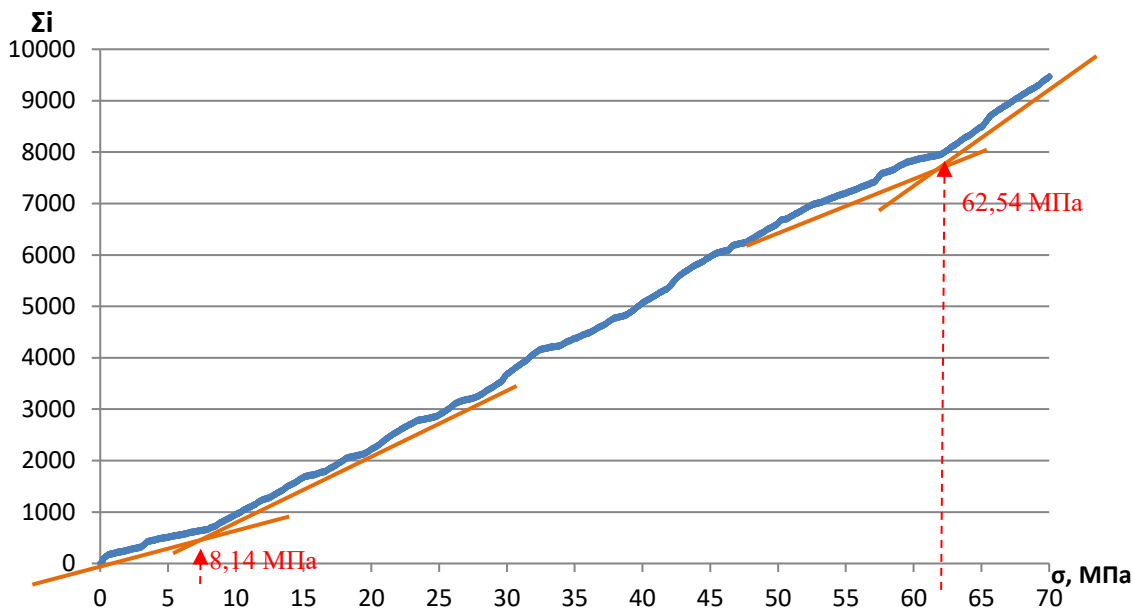


Рис. 1. График зависимости суммарного количества импульсов (Σi) от напряжения (σ , МПа) для образца из интервала I (-130 – -130,5 м)

В результате, на пяти образцах были определены по два значения напряжений, меньшие из которых, вероятно, соответствуют современным напряжениям, действующим в массиве, большие значения напряжений массив мог испытывать в прошлом, например, в один из этапов складчатости, а на образце из интервала II определено только одно меньшее напряжение. Определенные таким образом напряжения представлены в табл. 1.

Для расчета действующих в массиве Коробковского месторождения напряжений был выбран разрез в северо-западной части по профилю XXVI, составленный по скважинам детальной разведки Стретенской залежи. В геологическом строении данного разреза участвуют крутопадающие толщи железистых кварцитов и сланцев коробковской свиты нижнего протерозоя, перекрытые сверху горизонтально залегающими мезо-кайнозойскими карбонатными и песчано-глинистыми отложениями мощностью 120 м.

Для изучения напряженного состояния массива выбранный геологический разрез

Коробковского месторождения был представлен в виде прямоугольной области шириной 400 м и глубиной 450 м (рис. 1). На эту область наложена прямоугольная сетка с шагом 5 м, имеющая по горизонтали 81 и по вертикали 91 точку. В каждой точке были заданы объемный вес пород, модуль упругости и коэффициент Пуассона, определенные в лаборатории. При определении напряжений применяется линейная упругая модель.

Оценка распределения напряжений в массиве пород осуществлялась с помощью вариационно-разностного метода составления сеточных уравнений, основанного на вариационном принципе Лагранжа, связанного с минимизацией функционала, представляющего потенциальную энергию деформируемого тела. Полученная таким образом система алгебраических уравнений решается методом последовательных приближений с чебышевским набором итерационных параметров и определенной перестановкой, которая позволяет минимизировать влияние погрешности округления на сходимость решения уравнений. Для записи уравнений в граничных точках используется прием учета значений функций в «законтурных точках». В итерационном процессе вычисляются узловые перемещения, по которым определяются деформации, а затем вычисляются напряжения.

В результате математического моделирования были определены напряжения в массиве горных пород, представленные на рис. 2.

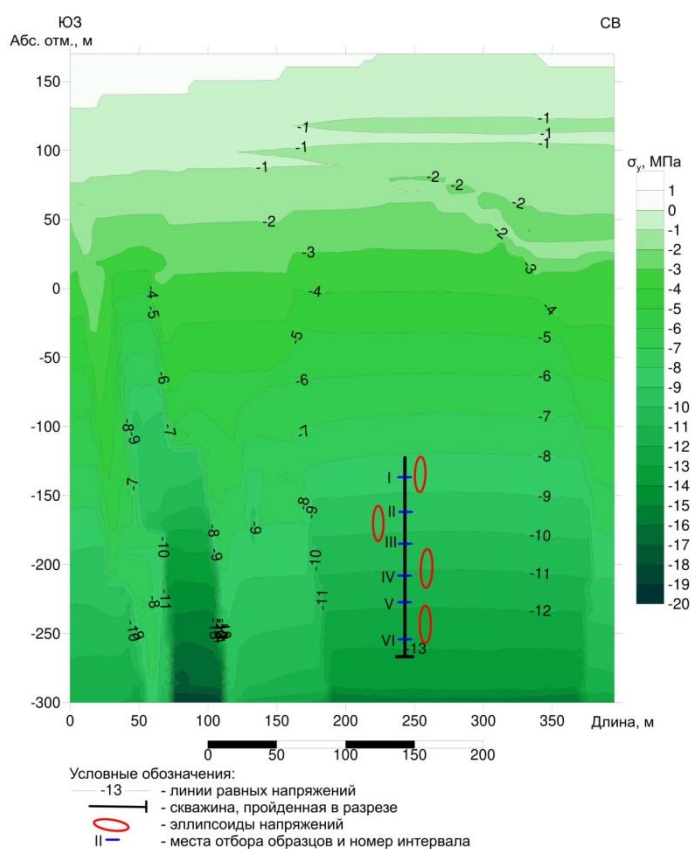


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений в массиве Коробковского месторождения

На рисунке показана скважина, из которой из шести интервалов толщи железистых кварцитов верхней железорудной подсвиты (PR₁kr₃) были отобраны образцы, которые

использовались для определения их напряженного состояния с помощью изучения акустоэмиссионного эффекта памяти. Результаты этого изучения показаны эллипсами напряжений, нанесенными вдоль скважины на рис. 2, и помещены в табл. 1.

Сравнение величин напряжений ($\sigma_{аэ}$), полученных методами, основанными на использовании акустоэмиссионного эффекта памяти, на образцах, отобранных из массива горных пород, с напряжениями ($\sigma_{мм}$) определенными в тех же точках массива с помощью математического моделирования, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение напряжений, полученных экспериментально, с напряжениями определенными с помощью математического моделирования для интервалов I-VI

Интервал	Глубина, м	$\sigma_{аэ}$, МПа	$\sigma_{мм}$, МПа
I	-130 – -130,5	8,14	8,67
II	-160 – -160,5	9,06	9,49
III	-180 – -180,5	10,02	10,35
IV	-210 – -210,5	11,47	11,21
V	-230 – -230,5	11,91	11,73
VI	-255 – -255,5	13,14	12,72

Сравнение результатов экспериментального определения напряжений с использованием акустоэмиссионного эффекта памяти с напряжениями, установленными расчетным способом, свидетельствует о близости установленных величин. Расхождение между ними не превышает 6%, а в среднем составляет около 4%.

Это только первый опыт применения данного метода по определению напряжений в массиве горных пород. Для его широкого использования необходимо продолжить исследования в этом направлении. Выполненная работа подтверждает возможность применения метода акустоэмиссионного эффекта памяти для изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

Литература

1. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор)// Акустический журнал. 2005, № 5, т. 51, с. 6-18.
2. Панасьян Л.Л., Лавров А.В., Мастюков А.Г. О показателе сохранности акустоэмиссионного эффекта памяти в некоторых типах пород. М.: Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. № 1, 2001, с. 55-58.
3. Панасьян Л.Л., Петровский М.А. Об использовании эффекта Кайзера для оценки напряжений в горных породах // Инженерная геология. № 2, 1984. с. 114-119.
4. Ржевский В.В., Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л. и др. Эмиссионные эффекты «памяти» в горных породах // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273. № 5. С. 1094-1097.

ПЛАНЕТАРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ УПРАВЛЯЕТ КОСМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

А.Д. Жигалин¹, Е.А. Крахина², В.С. Лавров¹

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН; МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, zhigalin.alek@yandex.ru*

² *Российский областной государственный университет, Мытищи*

Процессы и явления, протекающие на планете Земля и в околоземном пространстве взаимосвязаны. «Запуск» природных процессов может осуществляться как за счет источников земного происхождения, так и космических, и определяется солнечной активностью. Солнце оказывает мощное воздействие на все земные процессы и явления, посылая электромагнитное излучение и/или поток корпускул в сторону Земли. В результате происходит возбуждение магнитосферы и передача энергии в недра планеты, что может вызывать сейсмическую активизацию. Выбросы солнечной энергии также несут к Земле громадное количество тепловой энергии, которая, достигая атмосферы и гидросферы планеты, способствует формированию зон депрессии, в пределах которых ординарные атмосферные циклоны могут перерасти в сильные тропические штормы или, достигая максимального пика энергии, в тайфуны и ураганы.

Актуальность изучения предполагаемых солнечно-земных связей на фоне не утихающей дискуссии о смене климата, грядущей тепловой катастрофе и периодически «приближающихся к Земле астероидов-убийц» год от года возрастает, что требует контроля ритма жизни Земли в пространстве ближнего и дальнего Космоса. Такой контроль поможет более объективно оценивать возможность участия человечества в сохранении на планете биосферы как живой формы материального мира и самой планеты.

Электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца проникает в пределы магнитосферы, заполняя полупространство между фронтальной частью магнитосферы и поверхностью Земли. Как следствие, возникают магнитные бури и электрические возмущения в верхних слоях атмосферы. По своим энергетическим характеристикам происходящие в верхних слоях атмосферы события и наблюдаемые их отголоски на/вблизи поверхности Земли превосходят все известные нам эндогенные и экзогенные земные процессы, включая сильные землетрясения, цунами, тайфуны и другие события, относимые к категории стихийных бедствий.

В докладе представлены результаты анализа роли космической энергии в инициировании природных процессов в северном полушарии Земли, в частности, между солнечной, магнитной и сейсмической активностью. Были использованы данные по

солнечной и магнитной активности, а также сведения по сейсмическим и циклоническим проявлениям в течение двенадцатилетнего периода времени с 01.01.2007 по 31.12.2018 гг. На рис. 1 представлены графики изменения солнечной и магнитной активности, а также числа сейсмических событий за весь интервал времени.

Мощность вспышек варьирует от $\geq 10^{-4}$ Вт/м² (класс X) до $< 10^{-5}$ Вт/м² (класса C) при энергии выбрасываемых частиц от 1 до 10 ГэВ и более. Электромагнитная солнечная радиация, распространяющаяся со скоростью 300 тыс. км/с, достигает земной поверхности в течение 8-10 минут, после чего на Земле может возникнуть возмущение геомагнитного поля в виде магнитных бурь. Корпускулярная радиация (солнечный ветер) – состоит в основном из протонов и электронов, движущихся со скоростью 300-1500 км/с и практически полностью улавливаемых магнитосферой Земли. Магнитные бури, инициируемые корпускулярной радиацией, проявляются на Земле с запаздыванием на 2-5 суток.

При анализе данных удалось выделить взаимосвязанные временные интервалы событий: попарно солнечной и магнитной, магнитной и сейсмической активности, Основой анализа служила парадигма, постулирующая, что массивированный выброс в околосолнечное пространство корпускул и высокого уровня электромагнитной энергии, вызывает аномальное возмущение фронтальной части магнитосферы планеты. От границы магнитосферы возмущение передается в нижние слои атмосферы, достигая поверхности гидросферы и литосферы. Таким образом, конечным «продуктом» процесса передачи энергии является формирование цепи последовательных событий в системе «Солнце – магнитосфера – атмосфера – гидросфера + литосфера». Связь отдельных звеньев указанного процесса определялась величиной коэффициента попарной корреляции между солнечной активностью и активизацией магнитосферы и между активированной магнитосферой и проявлением сейсмической активности. Некоторые результаты анализа представлены в табл. 1 и 2.

При выборе интервалов сравнения был учтен временной сдвиг прихода электромагнитного и корпускулярного излучения, что позволило выявить природу солнечного воздействия, вызвавшего возмущение магнитосферы: электромагнитную или корпускулярную.

Сопоставление графиков позволяет говорить о наличии визуальной корреляции. Так, например, на Солнце в период с 8 сентября по 14 октября было зафиксировано 14 средних вспышек класса M. при этом пик выброса солнечной энергии наблюдался 10 сентября 2014 года, плотность теплового потока составила 2000 Вт/м². Эта сильная солнечная вспышка относится к классу X. Последующие средняя и сильная магнитные бури уровня G2 и G3 зафиксированы 12 и 13 сентября 2014 года. Солнечная вспышка средней силы (класса M),

произшедшая с 9 по 11 ноября 2014 года, повлекла за собой возбуждение магнитосферы Земли с формированием бури уровня G1, прошедшей с 14 по 15 октября 2014 г. Выбросам

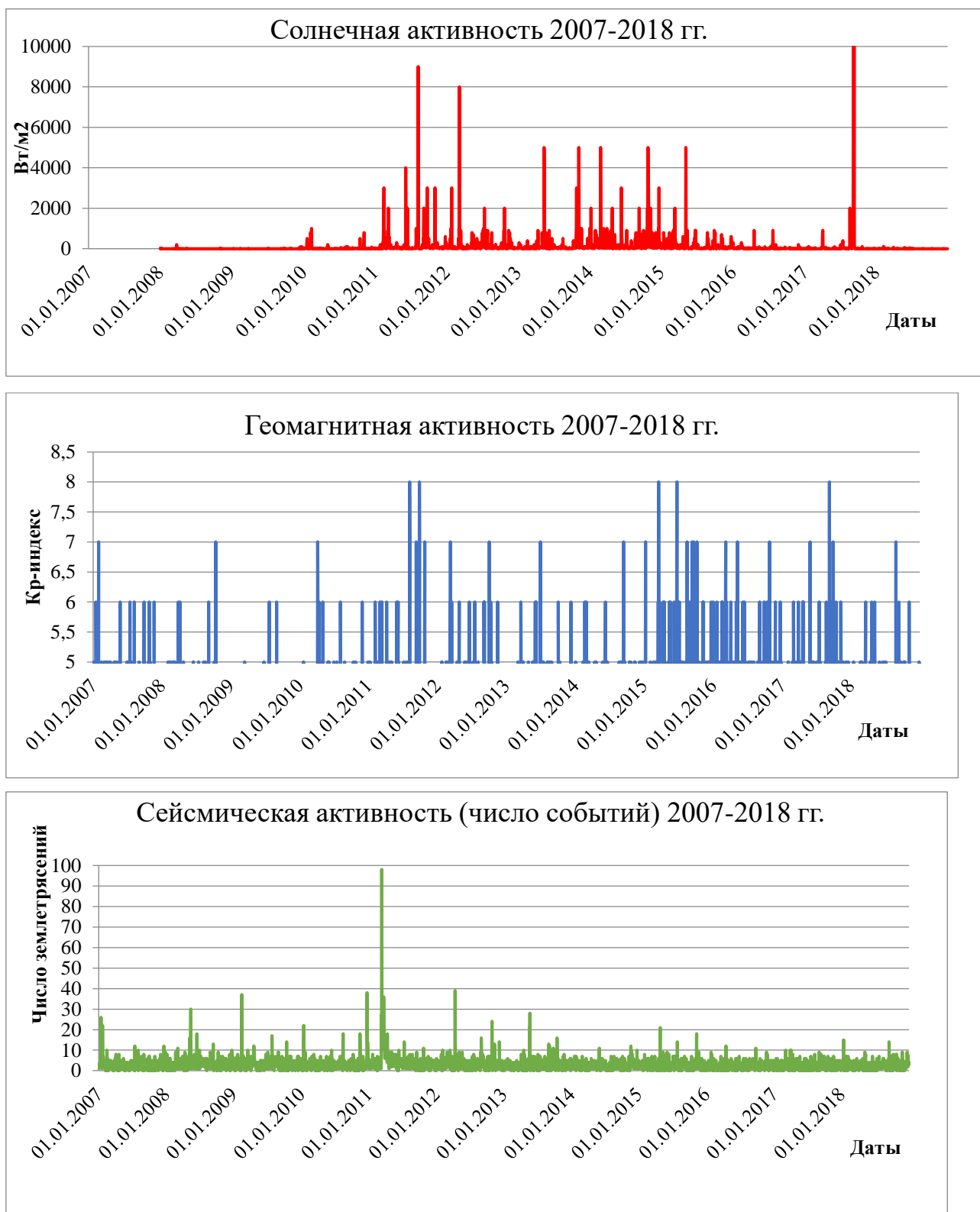


Рис. 1. Графики солнечной активности, возмущений магнитосферы и числа сейсмических событий за период времени с 1 янв 2007 по 31 дек 2018 гг. [1, 2]

солнечной энергии, которые были зафиксированы 13 и 20 июля 2017 г. в дальнейшем сопутствовало увеличение магнитной активности в период времени с 15 по 21 июля 2017 г. и

так далее.

Если говорить о связи возмущений геомагнитного поля с сейсмическими событиями, то следует отметить следующее. Например, геомагнитное поле находилось в заметно возбужденном состоянии с 6 по 19 мая 2015 г. Магнитные бури были зафиксированы 06 мая 2015 г., 13 мая 2015 г. и 19 мая 2015 г. Предположительно связанная с этими событиями активизация сейсмических процессов установлена с 7 по 17, с 19 по 21 и 29 мая 2015 г. с максимальной магнитудой землетрясения 6,9 12 мая 2015 г. В интервале времени с 6 по 13 мая были зафиксированы магнитные бури, которые, возможно, спровоцировали серию толчков в тихоокеанском регионе через 2-е суток, например, сильное землетрясение с магнитудой 6,1 08 мая 2015 г. в регионе Северная Суматра, Индонезия, 12 мая 2015 г. сильное землетрясение с магнитудой 6,9 вблизи восточного побережья о-ва Хонсю, Япония и др.

Таблица 1

Связь солнечной и магнитной активности

Активность	Даты событий		Смещение во времени (сут.)	Коэффициент корреляции	Связь солнечной и магнитной активности
	начало	конец			
Солнечная Магнитная	31.08.2011 03.09.2011	19.10.2011 22.10.2011	3	0,52	заметная высокая положительная
Солнечная Магнитная	08.09.2014 11.09.2014	14.10.2014 17.10.2014	3	0,57	заметная высокая положительная
Солнечная Магнитная	04.02.2015 11.02.2015	16.03.2015 23.03.2015	7	0,63	устойчивая положительная
Солнечная Магнитная	01.05.2015	27.05.2015	0	0,42	заметная положительная
Солнечная Магнитная	12.07.2017 15.07.2017	13.08.2017 16.08.2017	3	0,60	заметная высокая положительная

Таблица 2

Связь магнитной и сейсмической активности

Активность	Даты событий		Смещение во времени (сут.)	Коэффициент корреляции	Связь магнитной и сейсмической активности
	начало	конец			
Магнитная Сейсмическая	04.09.2011 09.09.2011	18.09.2011 23.09.2011	5	0,46	заметная положительная
Магнитная Сейсмическая	25.04.2015 27.04.2015	26.05.2015 28.05.2015	2	0,54	заметная положительная
Магнитная Сейсмическая	01.05.2015 03.05.2015	27.05.15 29.05.2015	2	0,65	устойчивая положительная

Значения коэффициентов парной корреляции позволили установить, что связь между солнечной и магнитной активностью заметнее и устойчивее при корпускулярном воздействии на геомагнитное поле. На 5-ти интервалах временное смещение составляет трое и более суток, за исключением одного из интервалов, где солнечная вспышка и возмущение

магнитосферы наблюдались в один и тот же день (01.05.2015 и 27.05.2015). Взаимосвязь солнечной, магнитной и сейсмической активности оценивалась путем построения временных графиков изменения уровня солнечной активности, возмущенного состояния магнитосферы и предположительно связанных с этими событиями интервалов увеличения сейсмической активности.

Проведенный корреляционный анализ показал наличие заметной или устойчивой связи между космическими и земными экзогенными и эндогенными процессами. Солнце, своего рода триггер, посылает сигналы в виде всплесков и значительных по массе выбросов энергии и тем самым оказывает мощное воздействие, которое через определенный интервал времени отображается в виде реакции магнитного (геомагнитного) поля, возникновения специфических процессов в атмосфере и по мере достижения импульсов энергии поверхности гидросферы и твердой Земли активизации экзогенных и эндогенных геологических процессов.

Солнце является главным источником энергии, приводящим в движение практически все происходящие на Земле природные процессы. Корреляционный анализ в выбранных временных интервалах показал устойчивое влияние солнечной энергии на активизацию таких процессов, как вариации магнитной активности, активизация смещения блоков литосферы и проявлений аномальной сейсмичности (землетрясений с высокими магнитудами) и показал возможность существования функциональной связи тектонической и лунно-солнечной активности.

Данная область научных исследований находится в начале своего развития. Существуют различные теории о влиянии солнечной энергии на земные процессы, многие из которых не всегда подкрепляются фактическим материалом. Однако на основе результатов научных работ прошлых лет и постоянно пополняющихся знаний уже можно (и нужно!) формировать единую базу данных и в рамках ее унифицированную систему обработки накапливающихся данных о различных природных (и не только природных) процессах. Следуя этому пути, несомненно станет возможным решать задачи, связанные с прогнозированием тех процессов, которые сегодня относятся к категориям чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий.

Литература

1. Лаборатории Рентгеновской Астрономии Солнца ФИАН (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН), магнитная активность: https://tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html Дата обращения: 18.11.2019г.
2. Служба Срочных Донесений ФГБУН ФИЦ ЕГС РАН (ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»): http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm Дата обращения: 18.07.2019г.

ОПОЛЗНЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА УЧАСТКЕ ВОРОБЬЕВЫХ ГОР (МОСКВА): ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗЗРЕНИЯ

О.В. Зеркаль¹, И.В. Аверин², О.С. Барыкина¹, С.Ю. Маленкина¹, Е.Н. Самарин¹, И.К. Фоменко³, И.П. Гвоздева¹

1 - Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

2 - ООО «Инженерная Геология», Москва;

3 - Российский геолого-разведочный университет имени С. Орджоникидзе

Склоновые деформации на Воробьевых горах описывались с начала XIX века. В 1817 г. именно на склоне Воробьевых гор был заложен храм в честь победы над Наполеоном в Отечественной войне 1812 г. Однако, через пять лет, строительство этого грандиозного сооружения было остановлено, в значительной степени из-за разрушения оползнями закладываемых фундаментов. В середине XIX в. наличие оползней в районе Воробьевых гор нашло отражение на Карте Московской губернии. По той же причине в сороковых годах XX века высотное здание, впоследствии ставшее Главным зданием МГУ, было передвинуто от бровки склона. В 1959 г. на склонах Воробьевых гор рядом со станцией метро "Ленинские горы" (ныне "Воробьевы горы") была сооружена эскалаторная галерея-подъемник, закрытая через 30 лет из-за повреждений, вызванных оползневыми деформациями.

Оползневые процессы на Воробьевых горах исследуются на протяжении более 150 лет [1-12]. Более ста лет на рассматриваемом участке выполняются буровые работы, направленные на изучение особенностей геологического строения склона. С середины XX века на Воробьевых горах были организованы инструментальные режимные наблюдения за склоновыми деформациями. Однако, несмотря на столь пристальное внимание, уделяемое изучению оползневого склона в правом борту долины р. Москвы в районе Воробьевых гор, до сих пор существуют различные мнения, идут дискуссии о механизме формирования и истории развития оползневых процессов на рассматриваемом участке правого борта долины р. Москвы. Рассмотрим историю развития представлений и существующие современные воззрения на развитие оползневых процессов в районе Воробьевых гор.

Одним из первых вопрос развития оползневых процессов на Воробьевых горах и строения оползневого массива рассмотрел Б.М. Даньшин в 1937 г. На основании анализа данных бурения он отметил, что смещенные породы опускаются значительно ниже современного эрозионного базиса – дна р. Москвы [2]. Б.М. Даньшин Б.М. считал, что абсолютная отметка для этой долины равна 106 м, что на 12 м ниже современного естественного меженного уровня р. Москвы. На этом основании был сделан закономерный вывод о том, что оползневые процессы на рассматриваемом участке являются глубокими по

своему характеру. При этом, было предположено, что основная масса склоновых деформаций не современная, а более древняя. Б.М. Даньшин связал развитие оползневых процессов на Воробьевых горах с погребенной переуглубленной позднеледниковой долиной р. Москвы. Близкой точки зрения придерживался Н.А. Корчебоков с соавторами, отмечавшие, что для древнего оползневого массива «наинизшая отметка поверхности его смещения, равная приблизительно 95 м, находится ниже базиса эрозии древней ложбины, имевшей отметки 105-106 м» [4].

В 50^е-90^е г.г. XX в. представления о глубоком характере оползневых деформаций на участке Воробьевых гор не оспаривались. При этом принимался механизм общего регрессивного развития оползневых деформаций вглубь склонового массива (отступления бровки склона) по мере эрозионного размыва рекой оползневого языка. Большинство исследователей (М.В. Чуринов, В.В. Кюнтцель, М.Н. Парецкая и др.), изучавшие оползни Воробьевых гор во второй половине XX века, в качестве основного деформирующегося горизонта оползневых массивов рассматривали достаточно глубоко залегающие глинистые отложения оксфордского яруса [7, 10, 11]. Дискутировался только вопрос о возрасте формирования оползня.

Вместе с тем, в последние десятилетия отмечается пересмотр представлений о строении склонового массива на участке Воробьевых гор, взглядов на характер развития оползневых процессов на этой территории. Современные воззрения по этим вопросам, сформулированные в результате инженерно-геологических и изыскательских работ, широко выполнявшихся в последнее время на рассматриваемой территории, могут быть разделены на несколько групп.

Первую группу воззрений формируют представления о ... полном отсутствии оползневых деформаций на участке Воробьевых гор. Как следствие, на инженерно-геологических разрезах, сопровождающих результаты таких работ, не показываются оползневые образования. При этом, какого-либо инженерно-геологического обоснования такой точки зрения не приводится. Из этого можно сделать вывод о том, что представления об отсутствии оползней на участке Воробьевых гор, скорее всего, следует относить к примерам деградации инженерно-геологических знаний, к сожалению, имеющим место в практике производства инженерных изысканий.

Вторую группу взглядов образуют представления об отсутствии в районе Воробьевых гор глубоких оползневых смещений. Не отрицая наличия на Воробьевых горах оползневых деформаций, сторонники этих воззрений относят все описанные склоновые смещения на рассматриваемой территории к неглубоким – с глубиной захвата от нескольких метров, реже – более. Наиболее яркими сторонниками этой точки зрения являются представители

НИИОСП. В качестве обоснования представлений о незначительной глубине оползневых деформаций, как правило, приводятся результаты геотехнических расчетов при количественной оценке устойчивости склонов в районе Воробьевых гор.

Третья группа воззрений развивает сформировавшуюся в середине XX в. точку зрения об оползневых смещениях на участке Воробьевых гор, зона деформаций которых тяготеет к достаточно глубоко залегающим юрским глинам. В то же время, в составе представлений о глубоком характере оползней Воробьевых гор, дополнительно можно выделить два направления. В рамках первого направления, к сторонникам которого можно отнести специалистов Института геоэкологии РАН, Мосгоргеотреста, МГСУ и ряда других организаций, принимается «классическая» точка зрения об общем регрессивном развитии оползневых деформаций вглубь склонового массива в результате последовательного отчленения оползневых блоков по мере эрозионного размыва рекой оползневого языка. При этом, как правило, принимается, что перемещение оползневых блоков происходит по направлению к реке по единой поверхности (или близкой к единой зоне деформаций), тяготеющей к горизонту оксфордских глин [6, 8].

Для второго направления, развиваемого рядом специалистов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ, а также специалистами ООО «Инженерная Геология», характерны представления о более сложном, ярусном строении глубокого оползневого массива на участке Воробьевых гор, основанные на более детальном (чем при иных подходах) стратиграфическом описании строения массива (до свит). Всего было выделено три яруса оползневых блоков. Смещение оползневых блоков в составе того или иного оползневого яруса характеризуется как регрессивное. Подошва наименее глубоких оползневых блоков верхнего яруса тяготеет к абсолютным отметкам порядка 112-114 м, что соответствует отметкам голоценового эрозионного вреза, заполненного в русловой части долины реки современным аллювием. Подошва оползневых блоков среднего яруса близка к абсолютным отметкам порядка 106-108 м, что, в целом, соответствует отметкам кровли глин макарьевской свиты (*J_{3ox-km}*) в ненарушенном залегании. Подошва наиболее глубоких оползневых блоков нижнего яруса располагается либо в интервале залегания келловейских глин (чулковская свита), либо непосредственно в кровле каменноугольных отложений (как правило, в нижних, по направлению смещения, блоках).

Таким образом, в настоящее время имеется целый спектр существенно различных представлений о развитии оползневых процессов на Воробьевых горах и строении существующего оползневого массива, что, по-видимому, связано как с различными методическими подходами, используемыми при изучении инженерно-геологических условий на рассматриваемой территории, так и различной трактовкой получаемых материалов.

Вместе с тем, проблема оценки развития крупномасштабных оползней в бортах долины р. Москвы имеет не только научное, но и существенное практическое значение, учитывая, что оползневые склоны нередко формируют красивые природные ландшафты, которые в настоящее время все более в широких масштабах вовлекаются в освоение. В связи с этим, понимание особенностей развития оползневых процессов является важной предпосылкой для обоснования мероприятий по инженерной защите территорий и обеспечения безопасной эксплуатации возводимых объектов.

Литература

1. Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П. К вопросу о развитии оползневых процессов на Воробьевых горах (г. Москва) // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения. Матер. науч.-практ. конф. М. 2017. С. 111-117
2. Даньшин Б.М. Геологическое строение Ленинских гор в связи с некоторыми вопросами стратиграфии отложений меловой системы и оползневыми явлениями по берегу р. Москвы // Изв. Моск. геологического треста. 1937. №4. С. 3-23
3. Зеркаль О.В., Барыкина О.С., Фоменко И.К. Проблемы и современное развитие представлений о крупных оползнях г. Москвы (комментарии к статье М.П. Кропоткина, Н.А. Орловой «Крупные оползни Москвы - новые взгляды или новые заблуждения?») // Инженерная геология. - 2020. - Т. XV, №4. - С. 30-40
4. Корчебоков Н.А., Романов А.В., Яковлев С.Я. Оползни Ленинских гор // Геология в реконструкции г. Москвы. М.-Л. АН СССР. 1938. С. 377-390
5. Кропоткин М.П. Природа крупных оползней Москвы и Подмосковья // Инженерная геология. 2016. №1. С. 4-14
6. Кропоткин М.П., Орлова Н.А. Крупные оползни Москвы - новые взгляды или новые заблуждения? // Инженерная геология. 2020. Т. XV. №2. С. 20-34
7. Кюнтцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями // Бюлл. Моск. об-ва исп. природы. Отд. геол. 1965. Т. XL. №8. С. 93-100
8. Мамаев Ю.А., Козловский С.В., Ястребов А.А. Природа, факторы развития и динамика оползней в юрских глинах на территории г. Москвы // Геоэкология. 2019. №4. С. 40-50
9. Павлов А.П. Новые данные по геологии Воробьевых гор // Вест. естествознания. 1890. №7. С. 301-304
10. Парецкая М.Н., Пустыльник С.И. Основные направления многолетних работ Московской инженерно-геологической оползневой партии в изучении оползней Москвы и Подмосковья // Новые методы изучения инженерно-геологических условий. МОИП. Матер. науч. заседаний

секции инж. геол. за 1977-1978 г.г. М. 1981. С. 13-14

11. Чуринов М.В. Характеристика оползней правого берега р.Москвы на участке Ленинских гор и возможность строительного освоения этой территории // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Сб. 15. М. Госгеолтехиздат. 1957. С. 62-78

12. Nikitin S.N. Les environs de Moscou. Guide des excursions du VII Congres Geologique International. St-Petersbourg. 1897. P. 1-16

Н.Б. Артамонова, С.В. Шешенин

Уплотнение водонасыщенных дисперсных грунтов под нагрузкой, как правило, нелинейное и сопровождается большими деформациями. Решение нелинейной связанной задачи, описывающей деформирование грунта при оттоке или притоке жидкости, весьма актуально в различных областях хозяйственной деятельности человека. Геомеханическая реакция скелета грунта на изменение давления жидкости играет критическую роль, например, при деформировании дорожного полотна или при неравномерной осадке инженерных сооружений. Поэтому разработка нелинейной связанной модели консолидации, учитывающей упругопластическое поведение материала, сопровождающееся изменением пористости и проницаемости, является весьма актуальной. В работе представлена связанная физически и геометрически нелинейная формулировка краевой задачи консолидации при использовании подхода Лагранжа с адаптацией для твердой фазы и подхода ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) для жидкости в предположении квазистатического деформирования каркаса и приведены примеры численного моделирования для упругопластического деформирования водонасыщенного грунта.

Формулировка задачи и метод решения. Система уравнений задачи консолидации выведена из законов сохранения механики сплошных сред с применением пространственного осреднения по объему представительной области (RVE – representative volume element) и включает три уравнения: равновесия, фильтрации и изменения пористости [1,2]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (C^d(\mathbf{u}) : \nabla d\mathbf{u}) + \nabla \cdot (\sigma_{\%}^{eff}(\mathbf{u}) \cdot \nabla d\mathbf{u}) - \alpha \nabla dp - \\ - \alpha \nabla p \nabla \cdot d\mathbf{u} + \alpha \nabla p \cdot \nabla d\mathbf{u} + \rho df = 0 \\ n(\mathbf{u}) \nabla \cdot \left(\frac{k_{\phi}(\mathbf{u})}{n(\mathbf{u}) \gamma_f} \nabla p \right) = \nabla \cdot \mathbf{u} + n \beta_f \mathbf{p} \\ \mathbf{u} = (1-n) \nabla \cdot \mathbf{u} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{u} = \partial \mathbf{u}(\xi, t) / \partial t$, $\mathbf{p} = \partial p(\xi, t) / \partial t$, $\mathbf{n} = \partial n(\xi, t) / \partial t$, $C_{ijkl}^d = J^{-1} F_{ip} F_{jq} F_{kr} F_{ls} C_{pqrs}^E$ ($F_{\alpha\prime}$ – деформационный градиент, $J = \det F$), $C_{\alpha\prime}^E$ – касательный модуль ($C_{\alpha\prime}^E = \partial S_{\alpha\prime}^{eff} / \partial E_{\alpha\prime}$, $S_{\alpha\prime}^{eff}$ – второй тензор эффективных напряжений Пиола-Кирхгофа, $E_{\alpha\prime}$ – тензор деформаций Грина-Лагранжа), $\sigma_{\alpha\prime}^{eff}$ – эффективные напряжения Коши, f – массовая сила. Эффективные напряжения – это осредненные напряжения при нулевом поровом давлении.

Уравнения фильтрации и пористости в (1) были переформулированы в движущейся системе координат, связанной с лагранжевыми координатами $\vec{\xi}$ твердого скелета согласно методу ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) с использованием скорости жидкости относительно твердой фазы. Неизвестными переменными являются приращения перемещений $d\vec{u}^{\text{r}}(\vec{\xi}, t)$, давления жидкости $dp(\vec{\xi}, t)$ и пористости материала $dn(\vec{\xi}, t)$. Сжимаемость жидкости β_f , тензор $C_{\%}^d(\vec{u})$, коэффициент фильтрации $k_{\phi}(\vec{u})$, удельный вес жидкости γ_f и коэффициент Био α – параметры грунта и содержащейся в порах жидкости. Предполагается, что грунт полностью насыщенный, жидкость – ньютоновская и однородная. В задаче консолидации типичные граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{u} = 0; \quad \vec{\xi} \in \Sigma_u = \Sigma_1; \quad \sigma_{\%}^{\text{eff}} \cdot \vec{n} = \vec{S}; \quad \vec{\xi} \in \Sigma_{\sigma} = \Sigma_2 \\ \frac{\partial p}{\partial n} = 0; \quad \vec{\xi} \in \Sigma_w = \Sigma_1; \quad p = 0; \quad \vec{\xi} \in \Sigma_p = \Sigma_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Sigma_u \cup \Sigma_{\sigma} = \Sigma, \quad \Sigma_w \cup \Sigma_p = \Sigma, \quad \Sigma_u = \Sigma_w = \Sigma_1, \quad \Sigma_{\sigma} = \Sigma_p = \Sigma_2.$$

Согласно (2), часть границы ($\vec{\xi} \in \Sigma_1$) неподвижна и непроницаема. Остальная часть границы ($\vec{\xi} \in \Sigma_2$) – проницаема, и на ней действует поверхностная нагрузка.

Сначала первые два уравнения (равновесия и фильтрации) системы (1) решаются в предположении постоянной пористости. Для решения системы уравнений равновесия и фильтрации используется обобщение неявной схемы, предложенной в работе [3] с внутренними итерациями на каждом шаге по времени по методу Узавы [4]. Затем пористость пересчитывается из третьего уравнения (1). Для пространственной дискретизации использовался метод конечных элементов (МКЭ): трилинейные конечные элементы (Q1) для аппроксимации уравнения фильтрации и серендиповы квадратичные конечные элементы (Q2) для аппроксимации уравнения равновесия. (Конечный элемент Q2-Q1 для $d\vec{u}$ имеет 20 узловых точек, а для p – 8 узловых точек.)

Решение задачи об упругопластическом деформировании пористого водонасыщенного грунта. Для моделирования определяющих соотношений для упругопластического деформирования грунта при кратковременных нагрузках предлагается использовать модель Григоряна [5], обобщенную на большие деформации.

Для формулировки соотношений теории пластичности используется тензор Кирхгофа $\tau_{\%}^{\circ}$ [6,7]: $\tau_{\%}^{\circ} = J \sigma_{\%}^{\circ}$. Функция нагружения имеет вид: $f = \frac{1}{2} \bar{\tau} : \bar{\tau} - \frac{1}{2} F^2$, $F(\tau, \chi) = A + M \tau + \chi$. Здесь

$\bar{\tau} = \tau_{\%} - \tau^{\circ} \delta_{ij}$ – девиатор тензора напряжений, $\tau^{\circ} = \frac{1}{3} \tau_{ij} \delta_{ij}$. В работе [5] для сдвиговых свойств выбрана модель идеальной пластичности, но в численных расчетах удобно использовать малое изотропное упрочнение χ для устойчивости вычислений. Диаграмма для шаровых частей соответствует конкретной скорости нагружения (рис. 1).

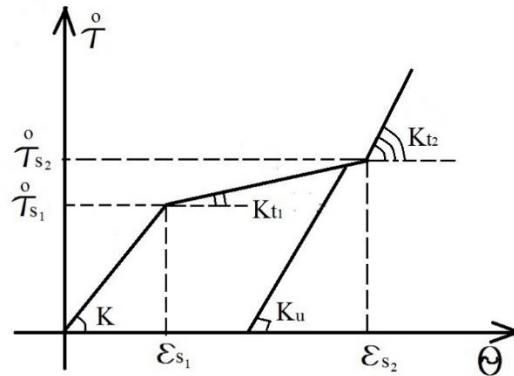


Рис. 1. Зависимость шаровых тензоров напряжения и деформации.

В настоящий момент расчеты проведены для достаточно малых деформаций 4-10%, поэтому были выбраны определяющие соотношения деформационного типа в рамках предположения, что для деформаций порядка 4-10% деформационная теория сохраняет приемлемую точность.

$$\mathfrak{S}_{ij}^{\circ} = 2\mu \left[(1-\omega) \left[\frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} \right] - \frac{\partial \omega}{\partial E_u} \frac{\bar{E}_{ij} \bar{E}_{kl}}{E_u} - \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \bar{E}_{ij} \delta_{kl} + K_t(\theta) \delta_{ij} \delta_{kl} \right] \mathfrak{E}_{kl}^{\circ},$$

$$\omega(E_u, \theta) = \left(1 - \frac{\mu_t}{\mu} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_s(\theta)}{E_u} \right), \quad \varepsilon_s(\theta) = \frac{\tau_s + b \tau^{\circ}(\theta)}{2\mu}, \quad \frac{\partial \omega}{\partial \theta} = \left(\frac{\mu_t}{\mu} - 1 \right) \frac{b}{2\mu} K_t(\theta),$$

$$\bar{E} = \frac{1}{2} (\bar{F}^T \cdot \bar{F} - I), \quad \bar{F} = \frac{F}{J^{\%}}, \quad J = \det F_{\%}, \quad E_u = \sqrt{\bar{E}_{ij} \bar{E}_{ij}},$$

ω – функция Ильюшина, \bar{E}_{ij} – компоненты девиатора накопленной деформации Грина-Лагранжа, E_u – интенсивность накопленной деформации, $K_t(\theta)$ – касательный модуль на диаграмме $\tau^{\circ}(\theta)$, $b = \operatorname{tg} \varphi$ – тангенс угла внутреннего трения, τ_s – предел текучести при $\theta = 0$, $F_{\%}$ – деформационный градиент, $d_{\%}^I(\dot{u})$ – тензор скоростей (дифференциалов) деформации, μ – упругий модуль сдвига, μ_t – касательный модуль сдвига, соответствующий малому упрочнению и выбираемый как вычислительный параметр для улучшения сходимости. Решалась модельная задача о действии штампа на область кубической формы с ребром 1 м,

штамп – квадратный со стороной 0,4 м. Материал – песчаный грунт. Выполнялись расчеты в четырех вариантах. На верхней границе задавалось перемещение штампа равномерно: 1) на первых четырех шагах по времени (общая деформация 4%), 2) на первых шести шагах по времени (6%), 3) на первых восьми шагах (8%), 4) на первых десяти шагах (10%). Остальная часть верхней границы свободна от напряжений. Боковые и нижняя границы области закреплены и непроницаемы. Вся верхняя граница проницаема, через штамп также может просачиваться жидкость. Величина шага по времени – 2,375 с. Зависимость коэффициента фильтрации k_ϕ от пористости $n(u)$ задавалась по формуле Козени [8]: $k_\phi(n) = \frac{d n}{1-n}$. Здесь $d = 5,67 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$, $k_\phi^0 = 10^{-4} \text{ м/с}$ (начальный коэффициент фильтрации до деформирования), $n_0 = 15\%$ (начальная пористость), $\gamma_f = 10^4 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}^2$. Свойства песчаного грунта, принятые в расчетах, задавались по литературным источникам [9]: $K = 100 \text{ МПа}$, $K_{r1} = 25 \text{ МПа}$, $K_{r2} = 5000 \text{ МПа}$, $\tau_{s1}^0 = 1,5 \text{ МПа}$, $\tau_{s2}^0 = 4 \text{ МПа}$ (рис. 1), $\tau_s^0 = 2 \text{ МПа}$, $\mu = 21,4 \text{ МПа}$, $\mu_t = \mu / 50$, $\varphi = 40^\circ$, $c = 0 \text{ МПа}$, $M = 1,336$, $A = 0 \text{ МПа}$ (для функции нагружения), $b = \text{tg}\varphi = \text{tg}40^\circ = 0,839$.

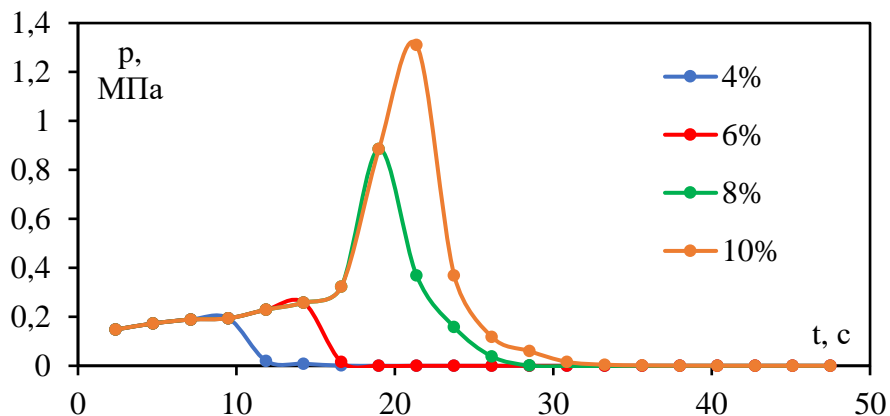


Рис. 2. Зависимость давления воды от времени в точке на глубине 0,1 м под серединой штампа.

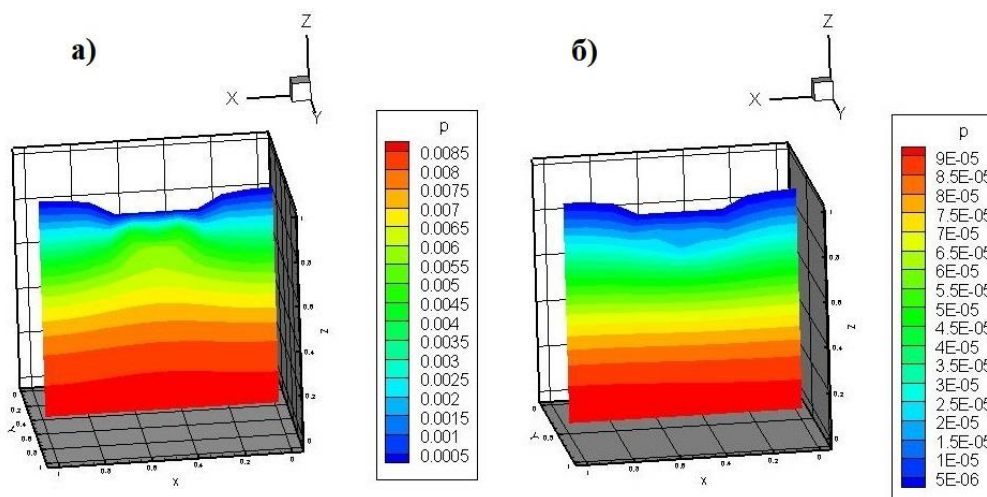


Рис. 3. Распределение давления воды в плоскости $Y = 0,5$ м а) на 10-м и б) 15-м шагах по времени (единицы измерения $P \cdot 10^{-2}$ МПа) (деформация 10%).

На рис. 2 показаны графики изменения давления воды от времени в точке на глубине 0,1 м под серединой штампа. На рис. 3 показано распределение давления воды в вертикальной плоскости, проходящей через середину штампа, на 10-м и 15-м шагах по времени. Как видно (рис. 3а), в области под штампом на 10-м шаге по времени заметна зона повышения давления воды. На 15-м шаге по времени (рис. 3б) распределение давления воды становится более равномерным, а величины давления ниже примерно на два порядка в результате оттока жидкости через верхнюю границу модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-01-00431_а).

Литература

1. Артамонова Н.Б., Шешенин С.В. Связанная задача консолидации в нелинейной постановке. Теория и метод решения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2020. Т. 26. № 1. С.122-138.
2. Шешенин С.В., Артамонова Н.Б. Моделирование нелинейной связанной задачи консолидации // Механика композиционных материалов и конструкций. 2020. Т. 26. № 3. С. 341-361.
3. Киселев Ф.Б., Шешенин С.В. Разностная схема для задачи нестационарной фильтрации в слоистых грунтах // Известия РАН. Механика твердого тела. 1996. № 4. С.129-135.
4. Быченков Ю.В., Чижонков Е.В. Итерационные методы решения седловых задач. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014, 349 с.

5. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // Прикладная математика и механика. 1960. Т. 24. С.1057-1072.
6. Simo J.C., Hughes T.J.R. Computational inelasticity. New York, Springer-Verlag, 1998, 392 p.
7. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. New York, Cambridge University Press, 2008, 340 p.
8. Гидрогеология. Часть 1 / А.Я. Гаев и др. Оренбург, ОГУ, 2010, 75 с.
9. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд // Под ред. Н.Н. Иванова. М., Транспорт, 1973, 328 с.