

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет



НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

***ЛОМОНОСОВСКИЕ
ЧТЕНИЯ***

СЕКЦИЯ ГЕОЛОГИИ

***Подсекция
геофизики***

Руководитель – зав. кафедрой, профессор Булычев А.А.

СБОРНИК
ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Москва
2020

Содержание:

1. Применение многоуровневой магнитной съемки с использованием БПЛА для определения пространственного положения трубопроводов
М.В. Коснырева, К.М. Кузнецов, А.Ю. Паленов, Л.А. Золотая, И.В. Лыгин,
Д.А. Арутюнян 2
2. Комплексирование геофизических и геохимических методов каротажа при оценке ФЕС и органического вещества в карбонатном разрезе
Б.А. Никулин 6
3. Результаты электротомографических измерений с применением площадных многосегментных расстановок
Д.К. Большаков, И.Н. Модин, К.Д. Ефремов 10

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

М.В. Коснырева*, К.М. Кузнецов, А.Ю. Паленов,
Л.А. Золотая, И.В. Лыгин, Д.А. Арутюнян

(Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова)

На сегодняшний день, магнитная съемка применяется широким кругом научных и производственных организаций при решении специализированных задач: трассирование трубопроводов, поиски затонувших судов, неразорвавшихся авиабомб и подземных боеприпасов. Все эти задачи объединяются общей проблемой, которая связана с изучением магнитных аномалий, обусловленных магнитными источниками, лежащими на небольшой глубине, не превышающей 10 м, и создающими аномалии различной интенсивности от первых нТл до нескольких тысяч нТл.

Доклад посвящен совместному анализу данных многоуровневой магнитной съемки, проведенной на одном из тестовых участков магистральной газопроводной сети, размером 1 км×1 км. Основной задачей проведенных исследований являлась разработка оптимальной методики и оценка практической возможности маловысотной аэромагнитной съемки на беспилотном носителе при решении задач поиска и локализации разнотипных железосодержащих техногенных линейных объектов.

Магнитная съемка выполнялась в наземном варианте на высоте 2 метра (высота магниточувствительного элемента) над поверхностью Земли и в аэро варианте на беспилотном носителе квадрокоптерного типа на высотах 5 метров и 20 метров. По результатам проведенных полевых работ получены аномальные магнитные поля, измеренные на трех высотах – 2 метра, 5 метров и 20 метров. Аэромагнитная съемка выполнена по новой технологии низковысотных съемок с применением аэромагнитного комплекса Геоскан 401, созданного на базе квадрокоптера и квантового магнитометра.

На рисунке 1 (а, б, в) приведены карты аномальных магнитных полей, полученные по результатам съемки многоуровневой съемки. Для центральной части участка (зона I) характерно спокойное аномальное поле со значениями от 0 нТл до -10 нТл. В пределах этой зоны (для высоты съемки 2 м) наблюдаются локальные мелкие изометричные аномалии шириной до 20 метров и интенсивностью до 100 нТл, связанные, вероятнее всего, с мелким железным мусором от строительства скважин или деталями сельскохозяйственной техники. На высотах 5 метров в 20 метров подобные локальные аномалии не выявлены.

В юго-западной части участка (зона II) наблюдается сложно построенная зона, состоящая из нескольких групп интенсивных знакопеременных аномалий различной ширины и амплитудами до 2000 нТл, связанная с техническими сооружениями скважин и линий

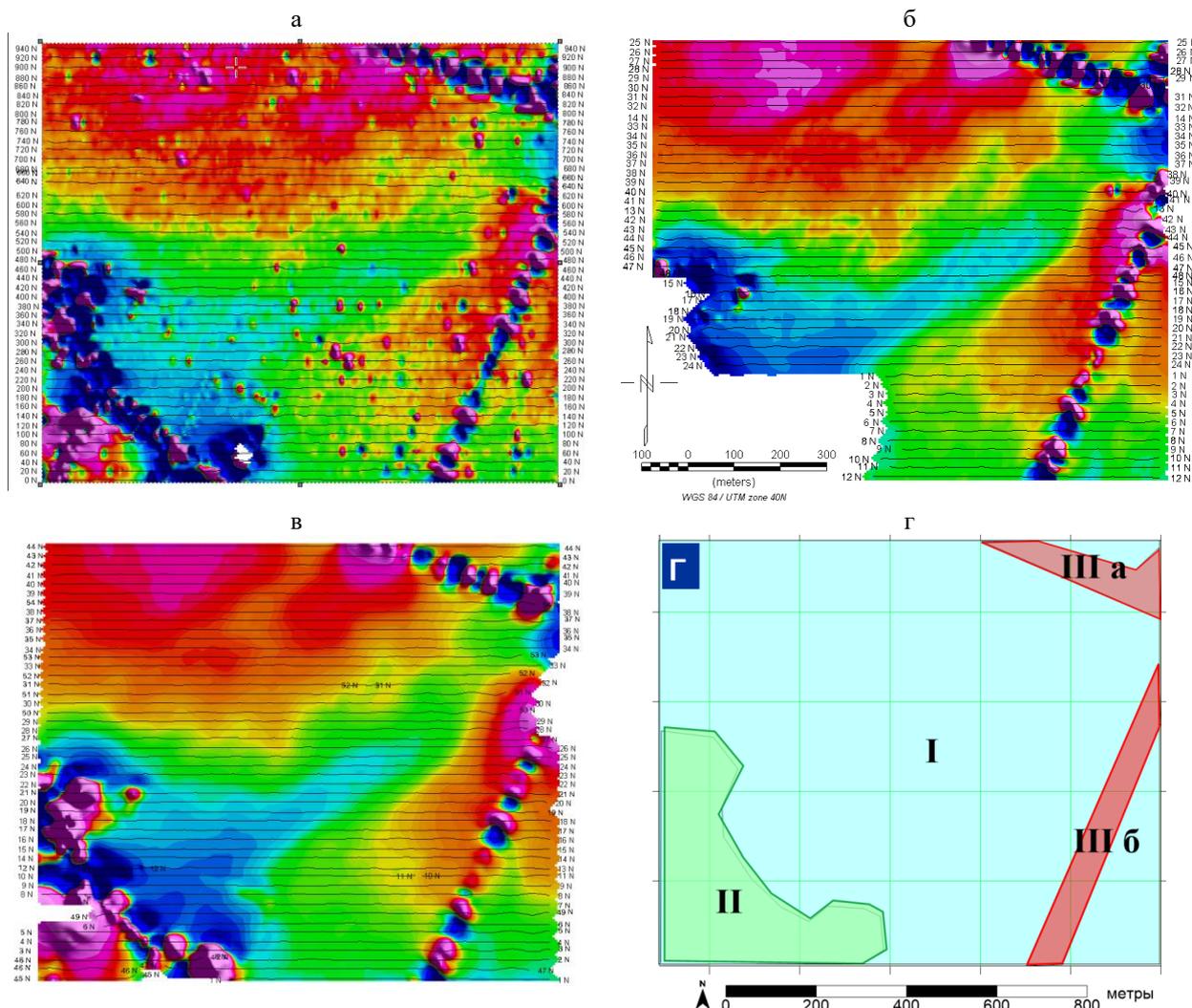


Рис. 1. Карты аномального магнитного поля различных уровней съемки (а – 2м, б–5м, в–20м) и схема качественной интерпретации (г)

электропередач (ЛЭП). Вдоль линии ЛЭП на расстоянии порядка 25-30 метров прослеживается линейная зона знакопеременных высокоамплитудных (до ± 500 нТл) изометричных аномалий, по характеру схожая с типичными аномалиями над трубопроводами. Эта линейная зона наиболее четко прослеживается на высоте наблюдений 2 метра. На высоте 5 метров на этой территории съемка не проводилась из-за наличия высотных помех. А на высоте 20 метров, она не так четко проявлена, хотя визуально прослеживается.

В восточной части участка наблюдаются две линейные знакопеременные аномальные зоны со сходным строением– северо-восточная (IIIа) и юго-восточная (IIIб), которые хорошо прослеживаются на всех высотных уровнях. Структура аномального магнитного поля этих зон соответствует аномальному полю над трубопроводами.

Трансформации являются наиболее распространенными способами преобразования и формального разделения потенциальных полей и сводятся к фильтрации наблюдаемого поля с целью выделения полезной информации и подавления помех.

Одним из наиболее эффективных методов разделения магнитного поля является аналитическое продолжение в верхнее полупространство пересчет на некоторую высоту Z . При таком пересчете соответственно возрастают глубины залегания источников, а амплитуды аномалий уменьшаются.

Анализ полученных трансформант показывает, что магнитное поле существенно затухает, на высотах 60 м и 100 м аномальный эффект от целевых объектов, расположенных в восточной части участка выявить практически невозможно, аномалии сильно сглаживаются и расплываются, а их интенсивность не превышает 3-5нТл. Интенсивная аномальная зона в юго-западной части участка, так же сильно сглаживается. Если в исходных полях мы можем четко разделить эффект от близко расположенных аномальных объектов (ЛЭП и трубопровода), то на высотах начиная с 20 метров этот эффект уже трудно различим. Наиболее наглядно это продемонстрировано на рисунке 2, где приведен юго-западный фрагмент участка исследования отснятый на 3 высотах – 2 метра (наземная съемка), 20 метров и 45 метров (аэровариант).

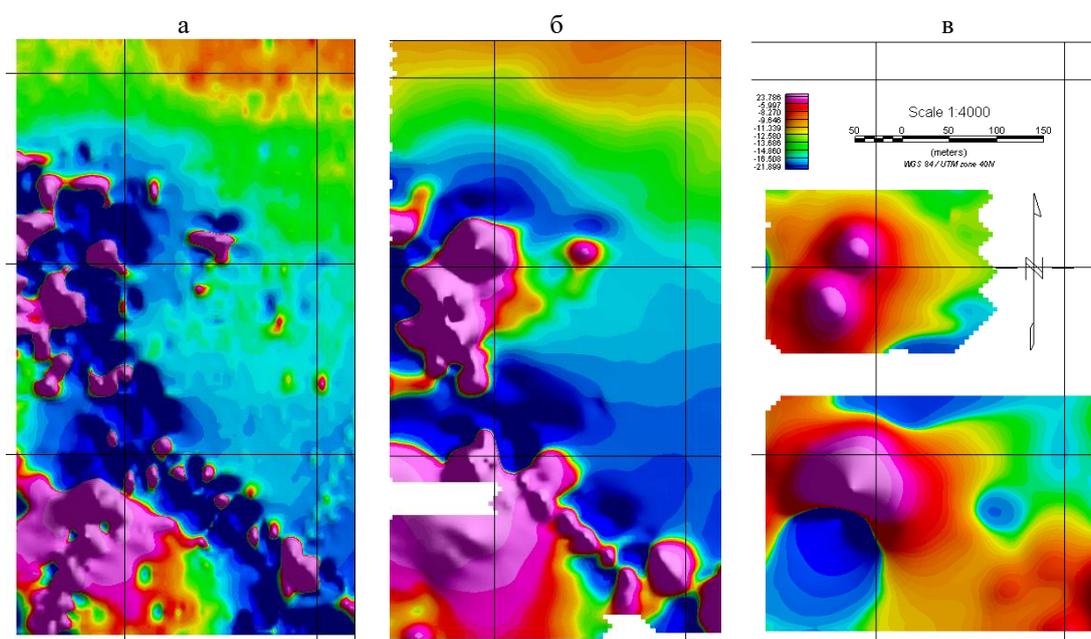


Рис. 2. Карты аномальных магнитных полей юго-западного фрагмента участка исследования: а - наземная съемка, б- высота наблюдений 20 метров, высота наблюдений 45 метров.

Таким образом, по результатам проведенных трансформаций можно сделать важный вывод: проведение магнитной съемки с целью выявления техногенных объектов целесообразно только на уровнях, менее 20 метров.

Выше уровня 20 метров аномалии затухают, ширина их значительно увеличивается, оба фактора затрудняют выделение, снижают точность локализации и идентификацию природы источника.

Для того что бы определить оптимальное расстояние между профилями при выполнении магнитной съемки с целью поиска подземных коммуникаций, был выполнен анализ магнитных полей, построенных с различным межпрофильным расстоянием. Результаты таких расчетов показали, что если протяженные аномальные зоны, связанные с трубопроводами на востоке участка продолжают трассироваться в магнитном поле, то в западной части информативность поля существенно теряется, появляются пропуски отдельных локальных аномалий. И аномальный эффект от трубопровода полностью сливается с аномалией, создаваемой ЛЭП. Таким образом, увеличение межпрофильного расстояния возможно только в случае поиска одиночных линейных коммуникаций, не имеющих изгибов и заведомо не осложненных влиянием других магнитных объектов.

Выводы

1. В результате выполненных наземных и аэромагнитных работ созданы разновысотные матричные модели и карты аномального магнитного поля для изученного участка работ.
2. Аэромагнитная съемка выполнена по новой технологии низковысотных съемок с применением аэромагнитного комплекса Геоскан 401, созданного на базе квадрокоптера и квантового магнитометра. Данная технология сочетает в себе высокую маневренность беспилотного летательного аппарата с высокой чувствительностью магнитометрического оборудования. Система позволяет выполнять высокоточные аэромагнитные съемки на предельно малой высоте с детальным огибанием рельефа, как в равнинной местности, так и в сложных ландшафтных условиях. В результате применения новой технологии удалось в разы повысить производительность съемки, относительно наземных работ, существенно улучшить детальность и разрешение магнитных измерений относительно аэромагниторазведки с пилотируемыми носителями.
3. Выполненная качественная и количественная интерпретация материалов площадных магнитных съемок на высотах 2, 5 и 20 метров позволила решить поставленную задачу: провести плановое картирование (локализацию) положения техногенных объектов и составить итоговую схему интерпретации данных наземной и аэромагнитной съемок.
4. По результатам проведенных исследований даны методические рекомендации по проведению магниторазведочных работ с использованием БПЛА с целью уточнения местоположения существующей подземной инфраструктуры.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПЕТРОФИЗИКИ И КАРОТАЖА ПРИ ОЦЕНКЕ ФЕС И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КАРБОНАТНОМ РАЗРЕЗЕ

*Никулин Б.А. * МГУ им М.В. Ломоносова*

В настоящее время при поисково-разведочных работах с целью определения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород и выделения нефтематеринских толщ необходима интеграция геохимических, петрофизических и геофизических исследований. Для решения этих задач, совместно с каротажными методами исследований, используются современные лабораторные геофизические методы (ЯМР, ЭПР, ГМ-С), газовые хроматографы, методы пиролиза (Rock-Eval), анализаторы шлифов и др., а также статистические методы обработки данных. В связи с этим, при обработке геофизических данных, приходится учитывать множество факторов, в том числе содержание органического вещества ОВ.

Оценка проницаемости карбонатных пород (Тиман) по данным ГИС статистическими методами. Задача достоверной оценки коллекторских свойств карбонатных пород, характеризующихся чрезвычайным разнообразием фильтрационно-емкостных параметров, сложным и невыдержанным строением имеет несомненную актуальность.

Формирование пустотного пространства – сложный процесс, который протекает под воздействием двух основных факторов – седиментационного и наложенных процессов. Причем от первичных седиментационных признаков, определяющихся фациальной зональностью, напрямую зависят структура пустотного пространства и ее дальнейшие вторичные преобразования (в первую очередь трещиноватость). В связи с этим, для повышения достоверности, интерпретация ГИС должна проводиться с учетом фациальной принадлежности пород, установленной по детальным литолого-петрографическим исследованиям, направленным на реконструкцию условий формирования потенциальных коллекторов. Применение статистических методов обработки данных ГИС и формирование петрофизических моделей позволяет формализовать процедуру их сопоставления с геологическими моделями, используя последние в качестве обучающих.

В настоящей работе были использованы результаты построения геологической лито-фациальной модели одного из районов вала Гамбурцева, проведена привязка ее к геологической модели (Жемчугова В.А / 5 /). Петрофизические исследования кернов выявили устойчивые связи проницаемости $K_{пр}$ с пористостью K_p в четырех лито-фациальных зонах (F 1÷4) рис.1. При этом принимается что, K_p надежно определяется комплексом ГИС.

Таким образом, с целью определения $K_{пр}$ необходимо по комплексу ГИС провести типизацию разреза. Для решения задач типизации (классификации) данных нашли применение такие методы математической классификации, как регрессионные модели совместно с методом главных компонент и др. Ниже приводятся результаты статистической обработки данных комплекса ГИС при сопоставлении с априорными фациальными зонами F 1÷4.

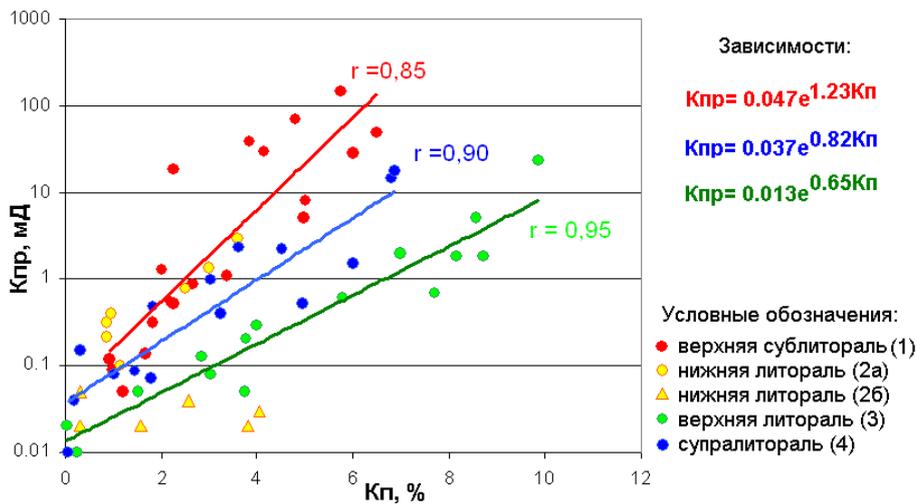


Рис.1. Сопоставление проницаемости с пористостью для различных литогенетических типов.

На рис.2 представлены графики пяти методов ГИС по отношению к F 1÷4. Как видно, ни один из методов однозначно все фации не выделяет. Для определения типа фации по эталонным данным комплекса ГИС (ГК, БК, WНК, АК, ГГКп) было рассчитано уравнение множественной линейной регрессии. Это уравнение имеет следующий вид:

$$F(1\div 4) = -2,47 \cdot \text{ГГКп} - 1,04 \cdot \lg \text{БК} + 4,8 \cdot W - 0,016 \cdot \text{АК} + 0,71 \cdot \text{Сгл} + 14,8, \quad (1)$$

где F(1÷4) – тип фации. Применяя метод расчета многомерной регрессии получен удовлетворительный результат прогнозирования с коэффициентом корреляции 0,8(±0,2). При этом следует отметить, что наилучшие результаты получены для пластов мощностью около 1,5 метра.

Оценка качества предлагаемой методики, проведенная на тестовых скважинах, показала ее эффективность, как для литогенетической типизации пород, так и для уточнения фильтрационно-емкостных свойств пород.

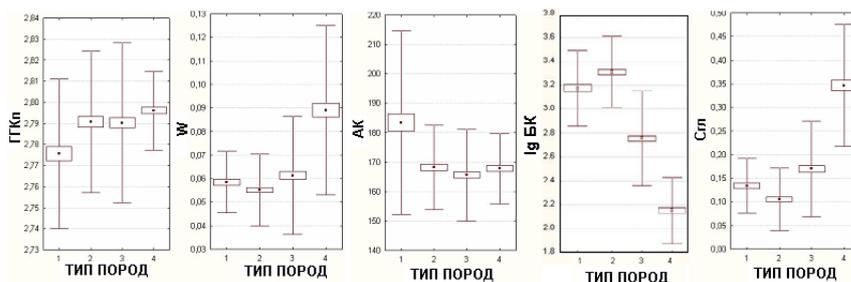


Рис.2. Графики пяти методов ГИС по отношению к типу пород F 1÷4.

Оценка содержания ОВ геофизическими и геохимическими методами

Продуктивность карбонатных пород с высоким нефтегенерационным потенциалом определяется седиментационными и наложенными процессами на этапах накопления ОВ и созревания керогена в различных структурно-вещественных и термобарических зонах.

В настоящей работе, приводятся результаты оценки содержания ОВ геофизическими и геохимическими методами в карбонатном разрезе скважины палеозойских отложений, расположенной в Калужской области (скважина №1 МГУ).

Исходными данными для исследований были каротажные измерения в скважине №1 МГУ методами: ГК-С(U,Th,K), БК, ГГМ-п; петрофизические и геохимические измерения проводились на кернах скважины: пиролиз (Rock-Eval), газовые хроматографы, спектральный рентгеновский анализ, ГМ, Кп, каппаметрия æ, плотностной ГГМ и др. При анализе учитывалась стратиграфия и геологическое описание кернов [1,2].

Оценка содержания ОВ геофизическими и геохимическими методами.

Исходными данными для исследований были каротажные измерения в скважине №1 МГУ методами: ГК-С(U,Th,K), БК, ГГМ-п; петрофизические и геохимические измерения проводились на кернах скважины: пиролиз (Rock-Eval), газовые хроматографы, спектральный рентгеновский анализ, ГМ, Кп, каппаметрия, плотностной ГГМ и др. При анализе учитывалась стратиграфия и геологическое описание кернов [1].

Разрез скважины представлен чередованием доломита, мергеля, гипса и песчано-глинистых слоев. В верхней части разреза присутствует чисто угольный пласт. Из коллекции кернов выделены 15 представительных образцов и проведен геохимический анализ в лаборатории ВНИИГеосистем [Чуткерашвили С.Е., Литвинова В.Н., 2015г.]. В результате анализа получены параметры и коэффициенты пиролиза, содержание ОВ, метана и других компонентов сорбированных газов.

Результаты пиролиза образцов представлены на рисунке 1. Из общего объема информации результатов геохимического анализа выделены: содержание ОВ и метана, а также тип керогена и степень его преобразованности. По соотношению Tmax и H1 можно предположить, что мы имеем дело с керогеном смешанного гумусо - сапропелевого типа с крайне низким уровнем преобразованности (стадия ПК). Содержание ОВ и метана отражены в таблице 1.

Используя содержание ОВ в качестве эталона, проведен регрессионный статистический многомерный анализ данных ГИС, петрофизики и метана на предмет их взаимосвязи с ОВ в породе. В таблице 1 приводятся результаты вычислений с коэффициентами корреляции (r).

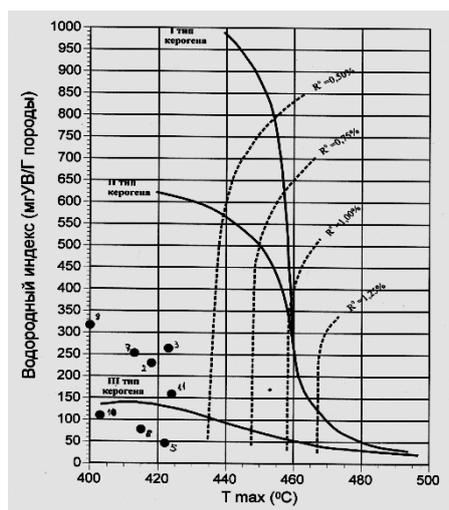


Таблица 1

ОВ от 0.27 до 28 (вес.%)
CH4 от 1 до 25 (10-2 см3/кг)
ОВ= F (Th/K, Th/U), r = 0.86
ОВ= F (Th/K, Th/U, CH4), r = 0.95

Рис. 4. Результаты пиролиза образцов

Корреляция ОВ с отношениями Th/K и Th/U достаточно высока и может использоваться на практике. Корреляция ОВ с метаном, Th/K, Th/U еще выше, при этом основную факторную

нагрузку несет метан. Соотношения U,Th,K в спектрометрическом методе ГМ-С являются весьма информативными и отражают в себе как минералогическую, так и фациальную обстановку разреза скважины. В плане практического применения, следует заметить также, что информацию о содержании метана можно получить из результатов газового каротажа.

Литература:

1. Пекин А.А., Гатовский Ю.А., Поляной Б.В. Верхнедевонские и нижнекаменноугольные отложения юго-запада Московской синеклизы по данным бурения Александровской скважины (Калужская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. геология. 2011. №1.
2. Пеньков В.Ф. Уран и углеводороды. Москва, Недра, 1989г. 143с
3. Титаева Н.А. Ядерная геохимия, изд. Московского Университета, 2000г. 235с.
4. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: оценки содержания ОВ геофизическими и геохимическими методами Справочник. Под ред. М.М. Добрынина М.: Недра. 1988.
5. Ботвиновская О.А., Никулин Б.А. и др. Обоснование геофизического комплекса для выделения литогенетических типов. Статья. «Нефтяное хозяйство», №8, 2008г. 13-18с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛОЩАДНЫХ МНОГОСЕГМЕНТНЫХ РАССТАНОВОК

Д.К.Большаков, И.Н.Модин, К.Д.Ефремов

Введение

Усложнение задач, связанных с изучением свойств и геометрии приповерхностной части геологической среды, требует совершенствования и развития широко применяемой в настоящее время технологии электротомографических измерений, выполняемых, как правило, с многоэлектродными расстановками, размещенными вдоль линии профиля наблюдений. Такое, – линейное (профильное), – расположение электродов (и сегментов электроразведочных кос, соединяющих электроды со станцией), обеспечивает поляризацию исследуемого геологического пространства электрическим током в одном направлении, которое совпадает с направлением профиля. В этом случае, в данных электротомографических измерений наилучшим образом проявляются такие границы неоднородностей по удельному электрическому сопротивлению, направление которых перпендикулярно направлению поляризации среды электрическим током (направлению профиля). При размещении на площади исследований системы параллельных профилей, значительно больший объем геологической среды оказывается охваченным электротомографическими измерениями. Однако, так как все измерения проводятся последовательно (профиль за профилем), без изменения технологии электротомографических измерений, то весь объем, фактически, обследуется по профильной методике, с одним (единым для всех профилей) направлением поляризации. Полученные таким способом площадные электротомографические данные часто называют «псевдотрехмерными», отражая, тем самым, использование только одного направления поляризации среды при их получении.

Особенности электротомографических измерений на площади

Использование при измерениях нескольких направлений поляризации среды способствует и приводит к многократному увеличению проявлений в данных особенностей строения исследуемой среды, выгодно и многократно подчеркивая влияние некоторых из них (Loke and Barker, 1996). Эти преимущества трехмерной электротомографии, с межпрофильными (действительно трехмерными) измерениями для каждого из направлений поляризации связаны с резким, весьма значительным (в разы, десятки раз), увеличением количества измерений (до 50-80 тыс. на одной расстановке). Необходимость выполнения десятков тысяч измерений только на одной площадной расстановке требует привлечения соответствующей аппаратуры (десятки измерительных каналов), позволяющей выполнять этот объем измерений «в разумное время» (несколько часов) и способной коммутировать электроды площадной расстановки (несколько сотен), соединенные со станцией сегментами электроразведочных кос (несколько десятков). Таким образом, лавинообразное увеличение количества измерений при получении действительно трехмерных электротомографических данных связано с многократной коммутацией расположенных на площади электродов и повторяющихся однотипных измерений для значительного числа направлений поляризации (десятки) с помощью специальных, разработанных для этих целей, аппаратуры и оборудования. В настоящее время такая аппаратура и оборудование для авторов сообщения недоступны.

Дополнительной особенностью и одной из объективных трудностей при использовании площадных систем электродов для получения данных трехмерных электротомографических измерений является полное отсутствие специальных программ для сбора, контроля, первичной обработки, анализа, редакции, визуализации, как полевых записей, так и результатов обработки. Другими существенными трудностями для выполнения измерений с площадными расстановками электродов являются:

- одновременное использование большого количества электродов и сегментов кос для одной площадной многосегментной расстановки (4-5 комплектов для профильных измерений);

- отсутствие возможности одновременного подключения к серийной аппаратуре для профильных измерений более одного комплекта электродов (в одной площадной расстановке 4-5 комплектов);

- для подключения к аппаратуре двух удаленных друг от друга сегментов одной площадной расстановки необходимы специальные удлинители (серийно не изготавливаются);

- полное отсутствие как самих последовательностей коммутации электродов площадной расстановки (протоколов измерений), так и программ для их составления, редакции и тестирования;

- полное отсутствие инструкций, методических рекомендаций по организации и проведению площадных электротомографических измерений для получения действительно трехмерных данных;

- отсутствие систем наблюдений, методических и технических приемов, применение и использование которых гарантирует получение кондиционных данных трехмерных электротомографических измерений, пригодных для проведения процедуры трехмерной инверсии;

- почти полное отсутствие публикаций полевых данных трехмерных электротомографических измерений, а также методических и технических приемов использования площадных расстановок

Таким образом, наличие в настоящий момент объективных трудностей и неблагоприятных особенностей, связанных с выполнением площадных электротомографических измерений, объясняет выбор исследователей в пользу получения псевдотрехмерных данных. Что подтверждается имеющимися, в основном зарубежными, публикациями (Модин и др., 2020; Павлова, Шевнин, 2013; Loke, 2018; Dahlin at all, 2002; Dahlin at all, 1997). Вместе с тем, в настоящем сообщении, несмотря на сложившуюся ситуацию, представляются трехмерные данные, полученные в результате электротомографических измерений на площадной многосегментной расстановке электродов с различными направлениями поляризации исследуемой среды.

Многосегментная технология электротомографических измерений на площади

Общим принципом многосегментной технологии является последовательное попарное использование всех сегментов многосегментной расстановки для выполнения измерений стандартной аппаратурой метода электротомографии с количеством электродов многократно превышающим количество электродов на двухсегментной расстановке (Большаков и др., 2019). Последовательное подключение сегментов электроразведочной косы к станции позволяет использовать при измерениях на площадной расстановке значительно большее количество электродов, чем при стандартной профильной технологии. Увеличение числа электродов требует большего времени на проведение измерений, создания вручную специальных последовательностей коммутации электродов, изготовления удлинителей для соединения со станцией удаленных сегментов. Однако, несмотря на эти дополнительные методические, технические и организационные трудности, исследователям предоставляется уникальная на сегодняшний день возможность получения трехмерных данных что, по мнению авторов, является важным существенным преимуществом многосегментной площадной технологии и значительным шагом в направлении развития метода электротомографии. Действительно, даже при отсутствии специальной аппаратуры и оборудования возможны разработка и совершенствование методических приемов, опробование различных площадных аналогов стандартных профильных электроразведочных установок и их комбинаций, проведение экспериментов направленных на развитие площадной методики измерений.

Появление новых трехмерных данных, получаемых по результатам опытно-методических работ, необходимость их обработки, анализа, визуализации и сравнения станет хорошим импульсом к развитию специального программного обеспечения, недостаток которого так сильно ощущается в настоящее время. Таким образом, преимущество применения многосегментной технологии для площадных измерений, в настоящее время, заключается как в самой возможности получения действительно трехмерных данных при изучении объема геологической среды, так и в возможности их использования (визуализация, анализ, редакция, обработка, инверсия, моделирование, методические выводы) для развития направления малоуглубинной трехмерной электроразведки.

Результаты измерений на площадной многосегментной расстановке

Для получения трехмерных данных авторами предложено несколько площадных расстановок (Большаков и др., 2019). Схема расстановки из восьми площадных сегментов (192 электрода) представлена на *Рисунке 1*.

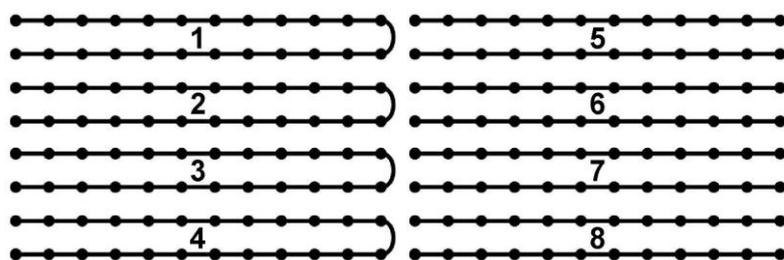
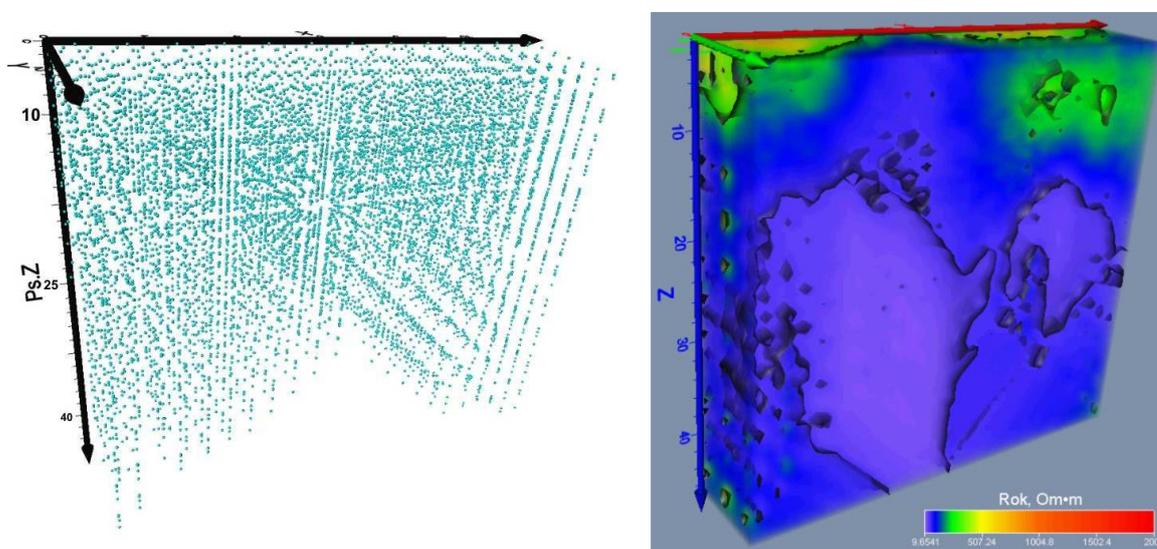


Схема расположения сегментов (черные линии, 1 - 8 – номера сегментов) косы для площадной расстановки 192 электродов (черные кружки) по равномерной сети.

В настоящем сообщении представляются результаты электротомографических измерений на территории Звенигородской биологической станции имени С.Н.Складовского биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (пос. Луцино, Моск. обл.). Измерения выполнены летом 2019 года с электроразведочной станцией «Омега-48» (ООО «Логис», www.logsys.ru) на площадной расстановке (46 x 12 м, аналогичная на *Рисунке 1*) из 144 электродов (шаг сети 2 м) При измерениях использовался расширенный комплект оборудования из шести стандартных сегментов электроразведочной косы и двух удлинителей, изготовленных дополнительно (длина 130 м, ООО «ГЕОДЕВАЙС», www.geodevice.ru).

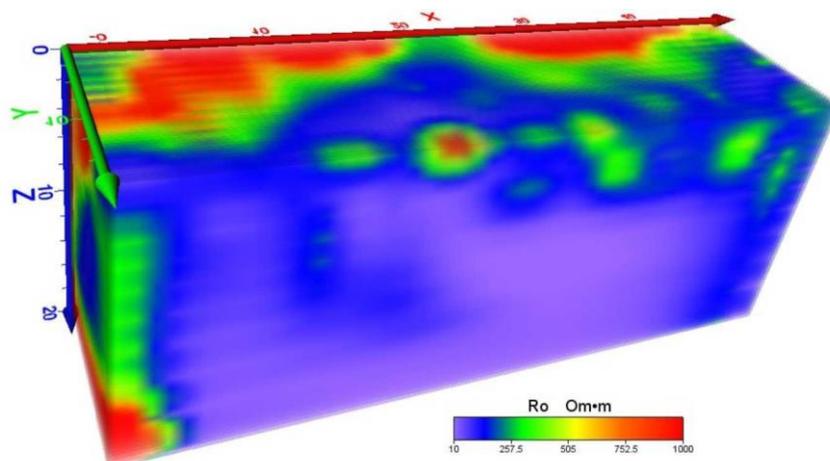
На *Рисунке 2* представлены пространственное расположение проекций точек записи и объемное распределение кажущегося сопротивления для комбинированной трехэлектродной установки.



Пространственное расположение проекций точек записи (слева) и распределение кажущегося сопротивления (справа) для трехэлектродной установки (изолинии 50 и 250 Ом·м).

Представленные на *Рисунке 2* результаты получены на месте расположения бывшего общежития студентов. Само здание не сохранилось, а частично сохранившийся, осевший фундамент (по-видимому, ленточный, кирпичный) засыпан песчано-глинистыми отложениями. Дневная поверхность участка исследований выровнена. Одной из особенностей результатов является использование в качестве питающих лишь четверти из всех установленных электродов. Для каждого положения питающего электрода на всех приемных диполях минимальной длины (2 м) выполнены измерения разности потенциалов в двух перпендикулярных направлениях (вдоль линий сети). Согласно классификации, предложенной в литературе (Loke, 2018, p.139), полученные трехмерные данные относятся к третьей категории. Основной целью выполненных на этом участке измерений являлось получение трехмерных данных и построения объемного распределения кажущегося сопротивления, в котором, по нашему предположению, на фоне изменений, вызванных увеличением глинистости и влажности, удовлетворительно проявится влияние остатков фундамента бывшего здания. Рассчитанные значения кажущегося сопротивления изменяются от 10 до 500 Ом·м. Возможно, высокие значения кажущегося сопротивления связаны с проявлением фрагментов фундамента.

Объемное распределение удельного электрического сопротивления, представленное на *Рисунке 3*,



Объемное распределение значений удельного электрического сопротивления по результатам трехмерной инверсии данных (программа «ZondRes3D», www.zond-geo.com).

получено путем трехмерной инверсии данных по программе «ZondRes3D» (www.zond-geo.com). Значения удельного электрического сопротивления изменяются от 10 до 1000 Ом·м. Точность подбора – 11%. Области с высокими значениями удельного электрического сопротивления (более 250 Ом·м), расположенные в приповерхностной части представленного объема, могут являться фрагментами кирпичной кладки фундамента здания. Полученный результат необходимо заверить прямыми методами (например, раскопками или шурфами).

Выводы

Переход от двумерной (профильной) электротомографии к трехмерной (площадной) связан с преодолением объективных трудностей. В частности, необходимость выполнения большого числа измерений и постоянной, многократной коммутации десятков (и даже сотен) электродов требует привлечения соответствующей дорогостоящей многоэлектродной и многоканальной аппаратуры.

Предложенная авторами технология электротомографических измерений на площадной расстановке большого количества электродов дает возможность получения трехмерных данных со стандартной аппаратурой, путем проведения последовательных измерений между всеми парами сегментов многосегментной расстановки. Основным ощутимым преимуществом многосегментной технологии измерений в настоящее время является возможность изучения сред со сложным геологическим строением по трехмерной методике.

Практическая значимость многосегментной технологии заключается в расширении возможностей метода электротомографии для решения прикладных инженерно-геологических задач, требующих построения трехмерных моделей.

Реализация многосегментной технологии при площадных исследованиях позволяет выполнять действительно трехмерные измерения электрического поля и получать такие полевые данные, которые в мировой практике применения метода осуществимы лишь при использовании специальной аппаратуры более высокого класса, способной одновременно коммутировать значительно большее количество электродов, чем стандартная аппаратура профильных электротомографических измерений.

Литература

- Большаков Д.К., Ефремов К.Д., Модин И.Н. [2019] Трехмерные измерения стандартной аппаратурой метода электротомографии на многосегментных площадных расстановках электродов. Тезисы докладов, на конференции «Инженерная геофизика – 2019», г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019. (10 стр.)
- Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2019а] Многосегментная технология измерений методом электротомографии. Тезисы докладов Научной конференции «Ломоносовские чтения - 2019», Секция «Геология», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019 года (16.04.19, <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>, 7 стр.)
- Модин И.Н., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Шевнин В.А., Марченко М.Н., Ефремов К.Д., [2020] 15 лет развития электротомографии в России. Тезисы докладов на 16-й конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2020», г. Пермь, Россия, 14-18 сентября 2020. (15 стр.)
- Павлова А.М., Шевнин В.А. [2013] 3D-электротомография при исследованиях ледниковых отложений. Тезисы докладов на конференции «Инженерная геофизика – 2013», г. Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2013. (7 стр.)
- Dahlin, T. and Bernstone, C., [1997] A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays, Procs. SAGEEP'97 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.
- Dahlin, T., Bernstone, C., Loke M. H., [2002] A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. Geophysics, 67, no. 6 (november-december 2002), 1692–1700.
- Loke M. H. and Barker R. D., [1996] Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, Geophysical Prospecting, 44, pp. 499-523.
- Loke M. H., [2018] Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (Copyright 1996-2018) Part 8, pp. 127-178. Web: www.geotomosoft.com