

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  
2024

## Содержание:

1. Развитие методики интерпретации магнитотеллурических зондирований с использованием синтетических данных П.Ю. Пушкарев, Д.Д. Попов, М.А. Суконкин . . . . .	2
2. Методика совместных измерений АМТЗ и глубинной электротомографии со станциями NORД В.А. Куликов, Е.А. Мокров, Н.Л. Шустов, А.Г. Яковлев, А.П. Ионичева . . . . .	7
3. Доказательство метеоритного происхождения озера Смердячье по комплексу геолого-геофизических данных К.М. Кузнецов, И.В. Лыгин, А.А. Фадеев, Т.Б. Соколова, О.О. Шевалдышева . . . . .	12
4. Методические аспекты проведения экспертизы наземной магнитной съемки при поиске алмазных месторождений Якутии Л.А. Золотая, К.М. Кузнецов, А.А. Фадеев, И.В. Лыгин, Т.Б. Соколова, М.В. Коснырева . . . . .	16
5. Локализация линейных и изометричных аномалий потенциальных полей на основе методов машинного обучения К.М. Кузнецов, А.Д. Шклярук . . . . .	21
6. Обработка аэроэлектроразведочных данных, полученных с применением беспилотных воздушных судов с наземным источником типа длинный кабель М.Н. Марченко, И.Н. Модин, А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов, С.И. Волков . . . . .	26
7. Формирование петрофизических моделей карбонатных пород с органическим веществом статистическими методами обработки данных ГИС Б.А. Никулин, Н.А. Скибицкая, А.А. Никитин . . . . .	31
8. Сравнение результатов двумерной инверсии полевых данных традиционных установок метода электротомографии Д.К.Большаков, И.Н.Модин . . . . .	36

# РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

П.Ю. Пушкарев, Д.Д. Попов, М.А. Суконкин

Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

## Введение

К числу актуальных вопросов интерпретации магнитотеллурических (МТ) данных относятся:

- подавление влияния локальных приповерхностных неоднородностей (ППН);
- трёхмерная (3D) инверсия ограниченных наборов МТ данных.

Для оценки эффективности методов решения этих задач мы используем синтетические МТ данные, то есть рассчитанные для определённых геоэлектрических моделей.

## Геоэлектрическая модель с приповерхностными неоднородностями

Для оценки эффективности методов подавления приповерхностных искажений рассматривается геоэлектрическая модель [1], содержащая глубинный трёхслойный разрез с проводящим грабеном и верхний слой (25 м) с множеством ППН (рис. 1).

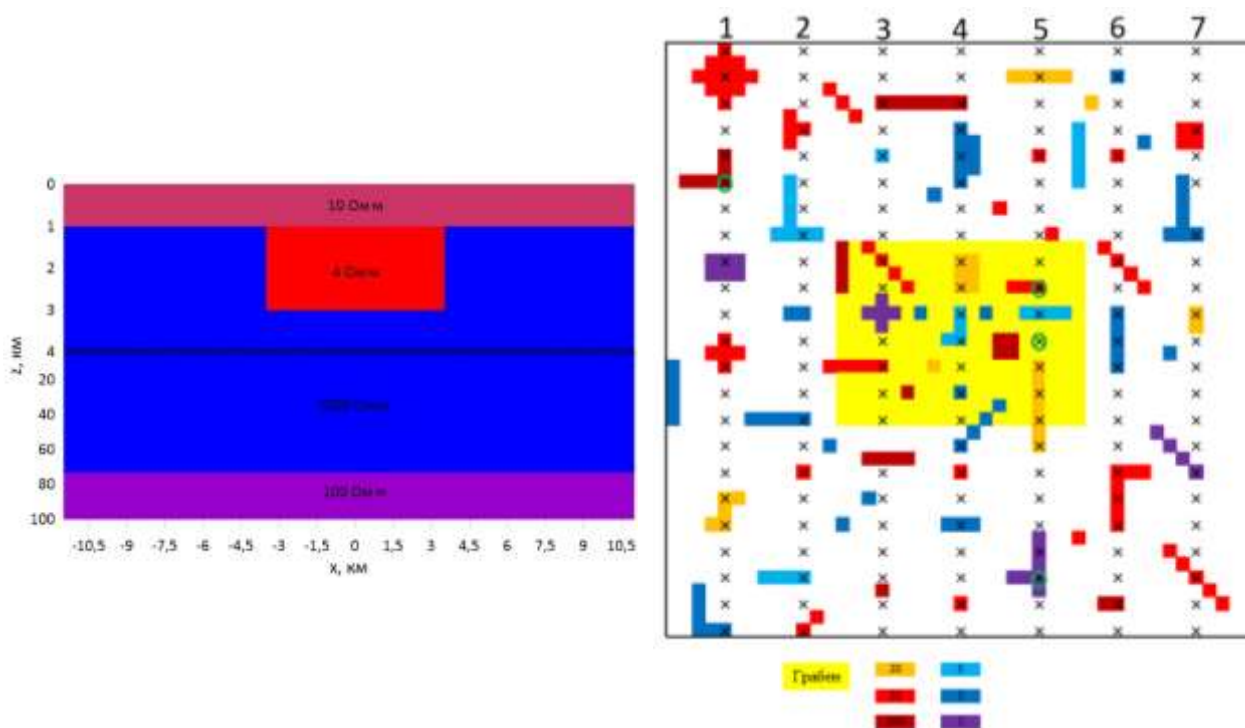


Рис. 1. Слева – глубинный разрез модели вдоль меридионального профиля. Справа – карта (22.5 x 22.5 км) верхнего слоя. Сопротивления ППН меняются от 1 до 100 Ом·м при фоновом значении 10 Ом·м. Жёлтый прямоугольник - положение грабена. Крестики – точки МТЗ.

Прямая задача решалась с помощью программы MT3DFwd [2]. MT данные были вычислены для двух вариантов модели: с однородным и с неоднородным верхним слоем.

Для перехода от компонент MT поля к передаточным функциям нами была разработана программа MTDA (MagnetoTelluric Data Analysis) в системе MATLAB. Она позволила вычислить компоненты тензора импеданса  $[Z]$ , матрицы Визе-Паркинсона  $[W]$ , магнитного тензора  $[M]$  и теллурического тензора  $[T]$ , а также их инвариантных параметров.

Приповерхностные искажения проявились на кривых кажущегося сопротивления в виде их смещения по уровню, на частотных разрезах – в виде «столбов», на картах – в виде локальных аномалий, наследуемых на всех периодах. Аналогичным образом ППН сказались на амплитудах компонент  $[T]$ . На фазовых характеристиках и на компонентах магнитных матриц  $[W]$  и  $[M]$  приповерхностные искажения отсутствуют.

### Оценка эффективности методов декомпозиции

Одним из основных подходов к подавлению влияния ППН является применение методов декомпозиции тензора импеданса  $[Z]$ . Их идея основана на матричном разложении:

$$[Z^S] = [e][Z^R],$$

где  $[Z^S]$  содержит суперпозицию локальных и региональных эффектов,  $[e]$  - вещественная матрица электрических искажений,  $[Z^R]$  - региональная составляющая тензора импеданса.

Пожалуй, наиболее важная информация, которую дают методы декомпозиции, это главные направления регионального тензора импеданса. В двумерных средах они совпадают с направлениями вдоль и вкrest региональных структур. В осесимметричных моделях они «закручиваются» вокруг структур, тяготея к радиальному и азимутальному направлениям.

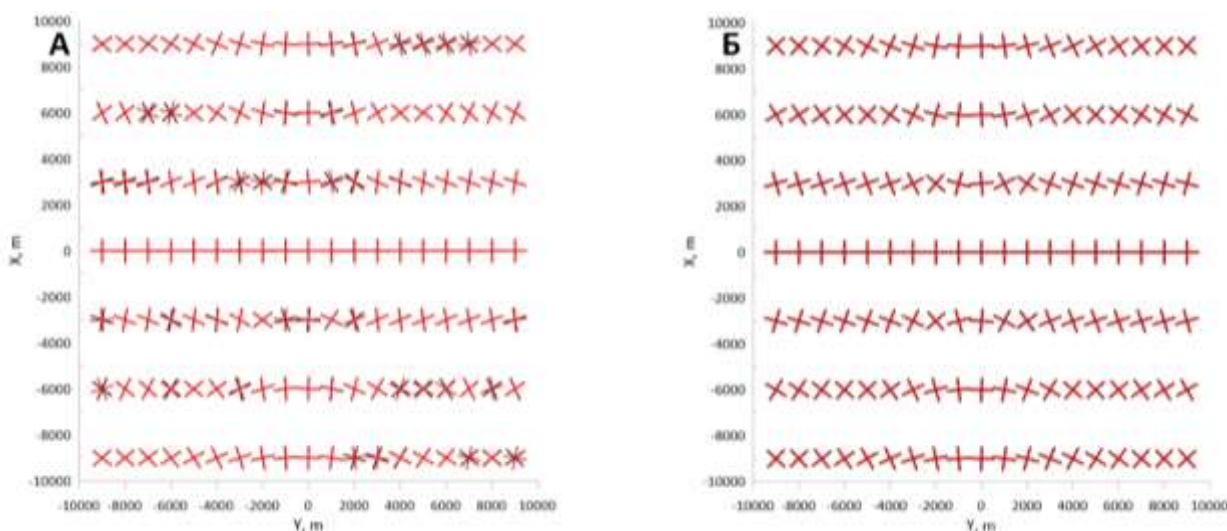


Рис. 2. Главные направления тензора импеданса, определённые методами Эггерса (А) и Бара (Б), карты на периоде 10 с. Чёрные крестики – для модели без ППН, красные – с ППН.

На рис. 2 представлены карты главных направлений, определённых методом Эггера [3], не различающим локальные и региональные эффекты, и методом Бара [4], относящимся к методам декомпозиции тензора импеданса. Видно, что наличие ППН искажает информацию о главных направлениях, определяемых методом Эггера, а метод Бара устойчив к их влиянию.

Наиболее информативным представляется метод фазового тензора [5], по отношению к которому метод Бара может рассматриваться как частный случай для сред с хорошо выраженной двухмерностью (или осевой симметрией) [6].

Теллурический тензор  $[T]$  редко используется при интерпретации, в том числе из-за сильных приповерхностных искажений. Однако, для  $[T]$  также можно записать разложение:

$$[T^S] = [e][T^R].$$

В докладе мы предлагаем адаптированный вариант метода фазового тензора для использования с теллурическим тензором  $[T]$ .

### Геоэлектрическая модель с неоднородностями на трёх структурных уровнях

Для оценки эффективности методов инверсии МТ данных нами составлена модель тектоносферы [7], содержащая слоистый разрез и 3D неоднородности на трёх уровнях (рис. 3):

- поднятие и прогиб в осадочном чехле (его проводимость меняется от 8.5 до 106 См);
- две вытянутые проводящие призмы в земной коре с азимутами простираения  $40^\circ$  и  $30^\circ$ ;
- слегка вытянутое поднятие проводящей астеносферы с азимутом простираения  $60^\circ$ .

Для упрощения построения 3D модели нами была разработана программа GMC (Geophysical Models Constructor) в системе MATLAB. Она позволяет на основе набора карт глубин залегания границ и ряда других параметров создать для заданной трёхмерной сетки массив значений свойств горных пород (в данном случае сопротивлений).

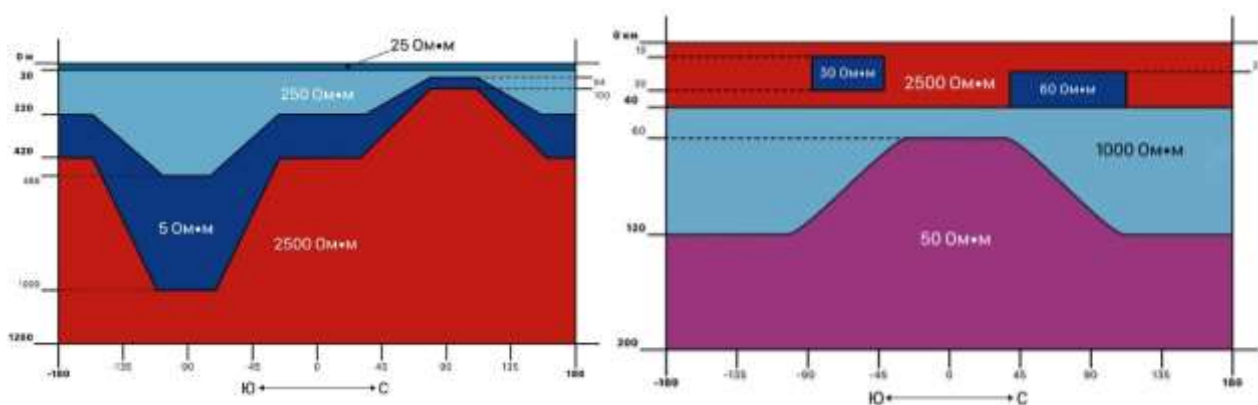


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы модели вдоль центрального меридионального профиля. Слева – до глубины 1200 м (осадочный чехол и верхняя часть фундамента), справа – до глубины 200 км (земная кора и часть верхней мантии).

Прямая задача была решена с помощью программы MT3DFwd [2]. Были также рассчитаны варианты модели с отсутствием каждой из упомянутых выше структур. На этой основе был выполнен анализ чувствительности к этим структурам различных компонент МТ данных [7]: эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса, норм матриц [W], [M] и [T]. Он показал, что практически все эти компоненты обладают чувствительностью, существенно превышающей типичные погрешности наблюдений, при этом она наиболее высока к структурам в осадочном чехле, меньше по отношению к коровым призмам, а наиболее слабо проявляется в данных астеносферное поднятие.

### Оценка эффективности двумерной инверсии

Возможности 2D инверсии по получению образов структур нашей модели исследовались с помощью программы сглаживающей 2D инверсии ZondMT2D [8], широко применяемой в России в последние годы. Использовались данные по двум профилям, центральному меридиональному и центральному широтному, рассматривались различные компоненты данных и их комбинации (эффективный импеданс, поперечный импеданс, фаза продольного импеданса, типпер).

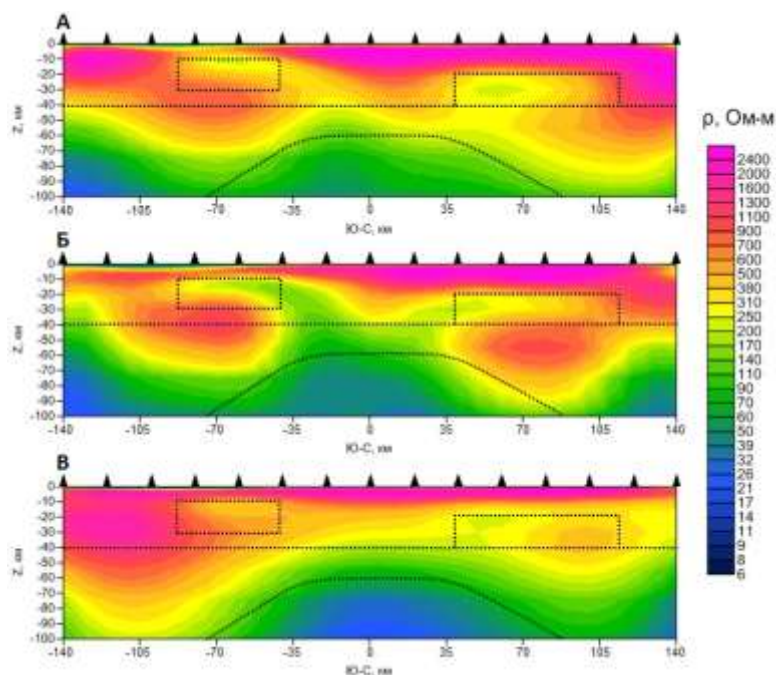


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы до 100 км по центральному меридиональному профилю по результатам 2D инверсии: А – эффективного импеданса, Б – поперечного импеданса, В – фазы продольного импеданса. Пунктиром показаны истинные границы структур.

На рис. 4 приведены примеры инверсии различных компонент по меридиональному профилю. Видно, что коровые призмы выделяются довольно успешно, хотя их сопротивления

завышены. Поднятие астеносферы определяется неустойчиво. Но следует отметить, что условия для 2D инверсии довольно сложные, структуры ограничены по простиранию и ориентированы под разными острыми углами к профилям, что создаёт сильные 3D эффекты.

Нами также был проведён эксперимент по инверсии зашумлённых данных. При добавлении случайного шума 2, 5, 10, 20 % результат постепенно ухудшается, при шуме 20 % глубинные структуры теряются.

### **Заключение**

В дальнейшие планы по направлению, связанному с подавлением приповерхностных искажений, входит оценка эффективности метода фазового тензора, а далее – опробование на синтетических данных методов нормализации амплитудных кривых МТЗ. По направлению, связанному с методами инверсии, планируется проведение 3D инверсии разных наборов МТ данных с использованием различных программ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер проекта 24-27-00147.

### **Литература**

1. Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями. *Геофизика*, 2023, № 6, с. 65-69.
2. Mackie R.L., Madden T.R., Wannamaker P.E. Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations. *Geophysics*, 1993, 58, p. 215-226.
3. Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor. *Geophysics*, 1982, 47, p. 1204-1214.
4. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*, 1988, 62, p. 119–127.
5. Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 2004, 158, p. 457–469.
6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, *Научный мир*, 2009, 680 с.
7. Попов Д.Д., Пушкарев П.Ю. Чувствительность магнитотеллурических зондирований к типичным аномалиям электропроводности в тектоносфере. *Вестник Московского университета, Серия 4 (Геология)*, 2023, № 6, с. 134-143.
8. Каминский А.Е. Программа интерпретации магнитотеллурических зондирований ZondMT2d: Руководство пользователя. СПб.: Zond Software, 2006, 22 с.

# МЕТОДИКА СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АМТЗ И ГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ СО СТАНЦИЯМИ NORD

В.А. Куликов<sup>1</sup>, Е.А. Мокров<sup>1</sup>, Н.Л. Шустов<sup>1</sup>, А.Г. Яковлев<sup>1</sup>, А.П. Ионичева<sup>2</sup>

*1- Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2 - ЦГЭМИ ИФЗ РАН*

## **Введение**

Одним из актуальных вопросов при проведении геометрических электрических зондирований остается вопрос выбора установки и методики измерений, которая бы позволила решить с необходимой точностью поставленную перед исполнителем задачу, при минимально возможных временных, человеческих и материальных затратах.

Ведущей технологией геометрических зондирований является метод электротомографии (ERT), которой характеризуется высокой плотностью наблюдений, арифметическим или кусочно-арифметическим шагом по разному, многократным использованием заземлений как в качестве питающих, так и в качестве приемных электродов.

Максимальная глубинность исследований со стандартными станциями для электротомографии составляет 100-150 м, поэтому при решении геологических задач, нацеленных на большие глубины исследования (например, при поиске рудных полезных ископаемых), многоэлектродные системы оказываются неэффективными и применяются другие методики полевых наблюдений. Среди наиболее распространенных – несимметричная установка Pole-Dipole + Dipole-Dipole и точечные зондирования в модификации электротомографии ТЗ/ЭТ-ВП. Для регистрации сигнала используют, как правило, одноканальные или малоканальные станции [1].

## **Проведение измерений методом глубинной электротомографии со станцией NORD**

Компания ООО «Северо-Запад» успешно применяет при проведении работ методом электротомографии для изучения разреза до глубин 400-500 метров несимметричную установку Pole-Dipole + Dipole-Dipole.

В предложенной установке используется большая длина питающего диполя (400-800 м) и приемные линии различной длины: от 10-20 м на малых, до 200-800 м на больших разностях. Шаг по профилю, в этом случае, составляет одну-две длины минимальной приемной линии [2].

Приемные электроды в такой установке соединены проводами с измерительной станцией и сматаны в косы. В качестве измерителя обычно используется 8-канальный ИМВП. Для достижения глубины исследования 400-600м, длина такой приемной косы должна составлять 1500-2000м. Одна из проблем методики заключается в большом количестве людей, задействованных в переносе косы по профилю. Как показывает многолетний опыт компании ООО «Северо-Запад», для работ с подобной установкой необходима бригада из 15-17 человек.



Использование новых электроразведочных станций NORD (ООО «Северо-Запад», <https://nord-mt.com>) позволяет усовершенствовать методику проведения работ методом ЭТ с установкой Pole-Dipole + Dipole-Dipole. Кроме того, в случае применения станций NORD, появляется возможность регистрации сигнала естественного переменного ЭМ поля земли во время переходов, т.е. значительного увеличения получаемого набора данных.

Последовательность работы со станциями NORD следующая. После устройства питающей линии АВ, на всех разносах расставляются установки для измерения методом АМТЗ – две приемные линии MN и два датчика для измерения магнитного поля. С целью снижения трудозатрат, магнитные датчики можно расставлять через одну станцию (рис. 1,1). Азимуты линий и датчиков определяются азимутом питающей линии АВ, т.е. раскладываются вдоль и перпендикулярно ей. На каждой точке запускается станция NORD. В питающую линию подаются «свип-сигнал» в режиме прямоугольного разнополярного импульса диапазона аудио-частот (0.1 – 10<sup>4</sup> Гц). К линии АВ через датчик Холла также подключается станция NORD для постоянной записи тока. По окончании записи две или три станции с самых первых разносов переносятся в конец профиля, а на их место перемещается питающая линия (рис. 1,2). В процессе переноса станций и линии АВ, оставшиеся на местах станции NORD ведут запись естественного поля земли (режим АМТЗ (AMTS)). После переноса в питающую линию подается «свип-сигнал» и процесс повторяется (рис. 1,3).

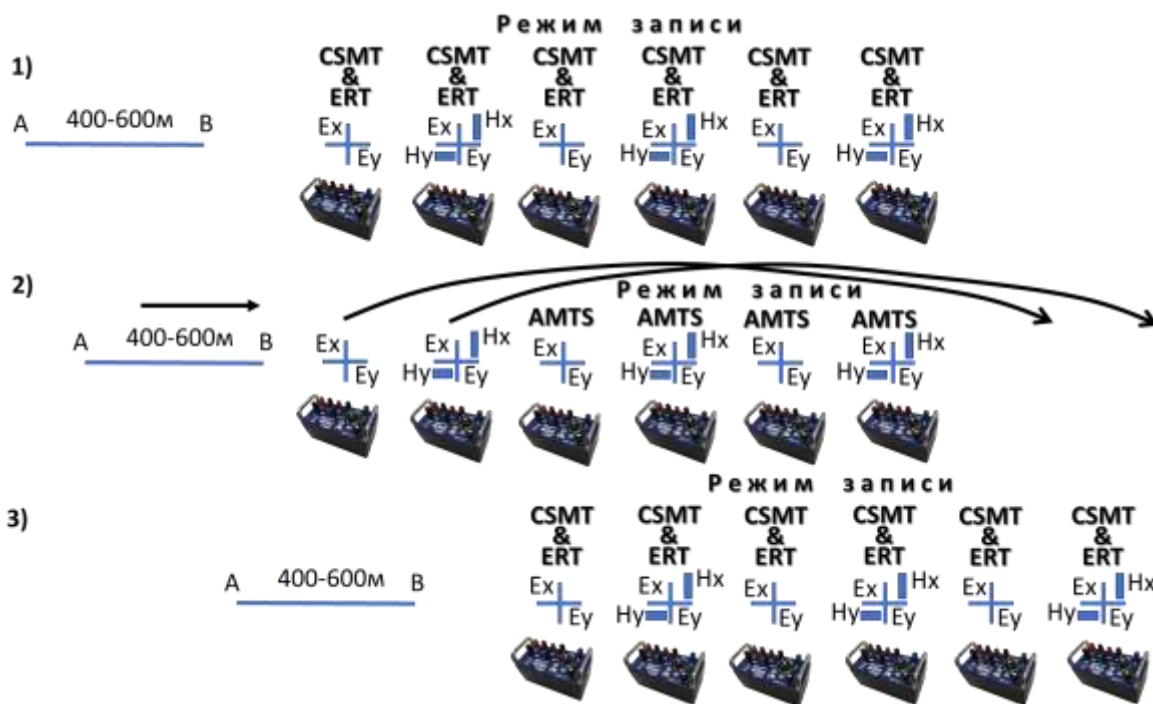


Рис. 1. Методика работ со станциями NORD.

## Обработка и интерпретация данных

Обработка записей проводится с использованием программы EPI-KIT [3]. Записи, сделанные без источника, обрабатываются в режиме «МТЗ», записи от источника обрабатываются в разделе программы «CSMT». Для обработки записей от источника необходимо загрузить также записи тока, полученные с линии АВ.

В результате обработки, описанной выше последовательности измерений, мы получаем широкий набор данных на каждом разносе:

- для метода электротомографии, мы по значениям напряжения на самой низкой частоте рассчитываем кажущееся сопротивление, а кажущуюся поляризуемость можем рассчитывать через фазу на низкой частоте, через дифференциальный фазовый параметр (ДФП), посчитанный по двум самым низким частотам «свип-сигнала» или по амплитудным параметрам типа PFE [4];
- для метода АМТЗ мы получаем набор параметров импеданса по нескольким записям на каждой точке профиля;
- для метода частотного зондирования мы можем рассчитать кривые кажущегося сопротивления от частоты для любой из измеренных компонент (Е или Н), а также для их отношения (импеданса).

Дальнейшая интерпретации возможна в разных вариантах:

- отдельная 2D инверсия данных ЭТ с получением моделей УЭС и поляризуемости до глубин 400-600м;
- отдельная 2D инверсия данных АМТЗ с получением модели УЭС до глубин 500-2000м;
- совместная инверсия данных ЭТ и АМТЗ;
- интерпретация кривых ЧЗ в 1D или 2D варианте.

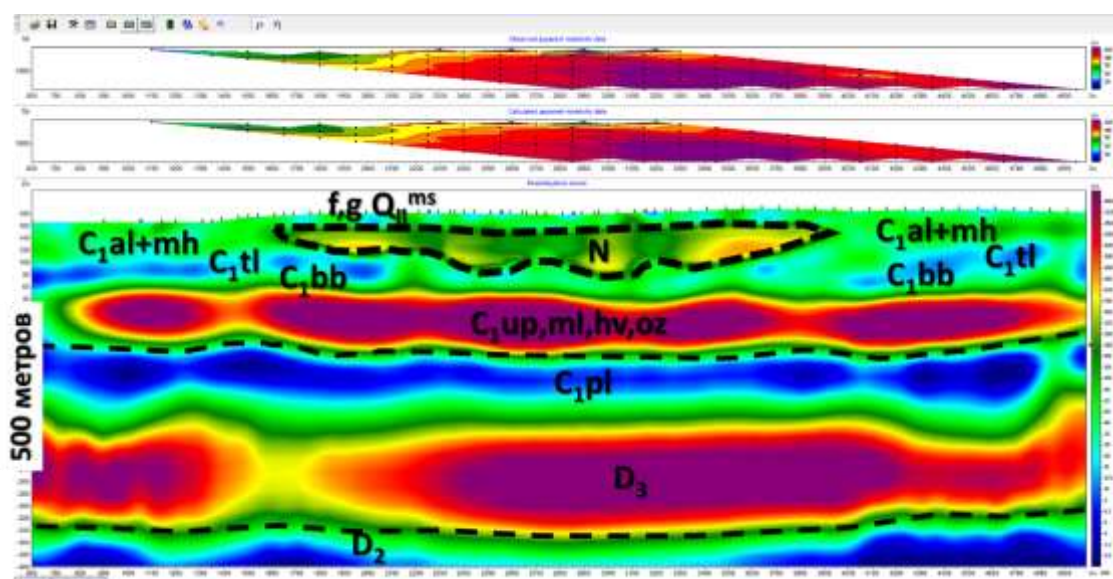


Рис. 2. Модель УЭС по результатам совместной инверсии ЭТ и АМТЗ.

## Заключение

### *Преимущества предложенной методики измерений*

1. Электроды на приемных линиях MN не соединены между собой проводами, что значительно упрощает производство работ с большими разносами:
  - препятствия на линии профиля проще преодолеть без проводов, их можно обойти, каждая бригада может выбрать свой путь перехода;
  - если электрод попадает на участок, где есть проблемы с заземлением (дорога, ручей и т.д.), то в косе его положение изменить нельзя, а в нашей установке допускается смещение разноса;
  - при переносе косы все приемные электроды вынимаются и перезаземляются после перехода. В общем случае места заземлений не совпадают. Это ухудшает учет влияния приповерхностных неоднородностей при инверсии. В нашем случае все линии и электроды, кроме 2-3 переносимых станций, остаются на месте.
  - для переноса косы длиной 1200-2000м с линией АВ требуется бригада в составе 15-17 чел, а для переноса двух-трех станций NORD и линии АВ достаточно 8-10 чел.
  - максимальный разнос ограничен только уровнем сигнала – можем делать геометрические зондирования до 3-4 км.
2. Мы получаем два набора данных – геометрическое зондирование и индукционное зондирование. Совместная инверсия такого набора данных существенно повышает устойчивость решения и дает дополнительную информацию о разрезе.
3. Для обработки записи ЭТ используется готовая программа обработки МТ полей ЕРІ-КІТ, настроенная на работу сигналов с небольшой амплитудой.
4. ВР можно рассчитывать по фазовым и амплитудным параметрам используя либо разложение одной низкой частоты на гармоники, либо используя две низкие частоты «свип-сигнала».
5. АМТ сигнал на каждой точке (кроме крайних) мы записываем неоднократно при переносе линии АВ. В итоге значительно возрастает количество накоплений и качество кривых.

### *Недостатки и трудности предложенной методики измерений*

1. Предложенная методика предполагает использования большого количества станций. В идеальном варианте – станции должны быть на каждом разносе и на линии АВ. Можно использовать в 2 раза меньше станций, но тогда возникает дополнительный перенос всех станций с малых разносов на большие.
2. Для предложенной методики работ необходим арифметический шаг по разносам – 100м, 150м, 200м. При любом выборе шага будет либо недостаток информации на первых разносах, либо избыток на последних.

3. Диапазон частот метода АМТЗ: 1 Гц – 10000 Гц. Для измерения самых высоких частот необходима соответствующая частота дискретизации сигнала. Измерения в методе ЭТ делаются на низких частотах: 0.1-1 Гц. Т.е. станциям для записи сигнала АМТЗ приходится вести запись с высокой частотой дискретизации, которая избыточна для метода ЭТ. Выход из этой ситуации – использование режима децимации. Но даже при использовании децимации, объем данных за день работы будет большой, что увеличит время скачивания информации из станций и обработки.

### Литература

1. Оптимизация выбора установок электротомографии на основе 2d- и 3d-моделирования / В. А. Куликов, С. П. Корбутяк, А. В. Королькова, В. А. Поликарпова // Геофизика. — 2022. — № 2. — С. 86–94.
2. Куликов В. А., Бобачев А. А., Яковлев А. Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м // Геофизика. — 2014. — № 2. — С. 39–46.
3. Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных синхронных магнитотеллурических зондирований: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.10: защищена 16.05.2018. — М., 2018. — 133 с.
4. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей, том I, издание 2 / Е. Д. Алексанова, А. А. Бобачев, Д. В. Епишкин и др. — Полипресс Тверь, 2018. — 276 с.

# ДОКАЗАТЕЛЬСТВО МЕТЕОРИТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ОЗЕРА СМЕРДЯЧЬЕ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

К.М. Кузнецов<sup>1</sup>, И.В. Лыгин<sup>1</sup>, А.А. Фадеев<sup>1</sup>, Т.Б. Соколова<sup>1</sup>, О.О. Шевалдышева<sup>1</sup>

*1 – Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

На востоке Московской области, в Шатурском районе выделяется цепочка озер округлой формы, проходящая вдоль дороги г. Шатура – г. Рошаль и имеющая ЮЗ-СВ простирание: озера Бардуковское Черное, Бардуковское Белое, Власовское, Лемёшинское, и самое северное – Смердячье. Последнее расположено в 4 км к северо-западу от поселка Бакшеево у слияния рек Поля и Воймега. Диаметр озера Смердячье около 200 метров, а глубина достигает 25 метров. Вокруг него в рельефе проявлен кольцевой вал диаметром 350–400 метров и высотой 5–6 м. В 1985 году краеведом Н.А. Филиным предположено, что его происхождение связано с результатом падения метеорита [1; 2, 3]. В работе [2], основываясь на результатах эхолотирования дна озера, георадиолокационного профилирования по профилям вокруг озера, описании геологического разреза в шурфах, убедительно показано импактное происхождение структуры. На основе радиоуглеродного датирования образцов определен вероятный возраст падения метеорита – около 10,5 тысяч лет назад.

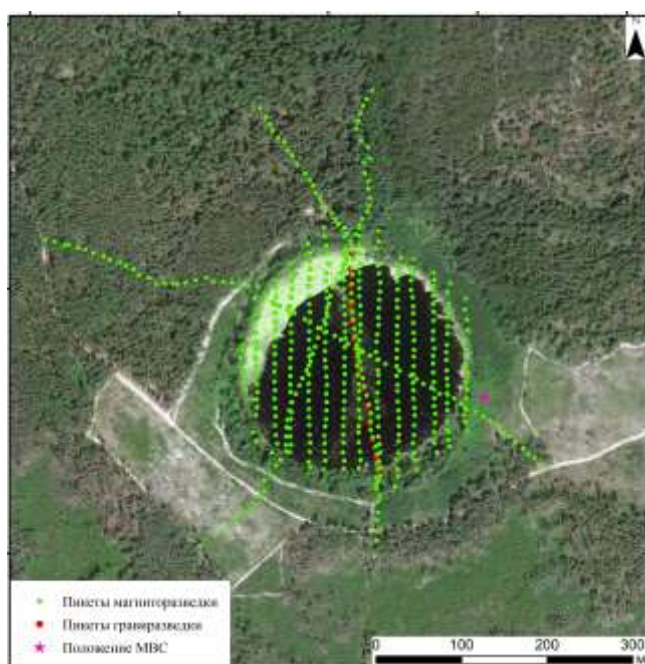


Рис. 1 Положение магнитометрических и гравиметрических пунктов съемки на оз. Смердячье на фоне космоснимка

В январе 2024 года сотрудниками и студентами кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова выполнены комплексные магнитометрические и гравиметрические исследования на площади озера и окружающего его вала (Рис. 1).

**Магнитометрические работы** выполнены протонными магнитометрами ММРОС-1. Для учета временных вариаций вблизи площади работ была установлена магнитовариационная станция.

Магнитометрические наблюдения можно разделить на 2 части:

1. Работы вдоль трех профилей, проходящих через озеро и валы, его окружающие. Протяжённость профилей составила около 600 м, шаг по профилю – 10 м.

2. Работы по равномерной сети профилей на площади замёрзшего озера. Расстояние между профилями 20 м, расстояние между точками измерения на профилях 10 м.

Общий объем работ составил 514 точек.

Вариационное поле в дни работ было спокойным: в период наблюдений вариации магнитного поля не превышали 11 нТл, а градиент вариаций – 1 нТл/мин.

Средняя квадратическая погрешность магнитометрических измерений, оцененная по 36 контрольным точкам, составила  $\pm 0,7$  нТл.

**Гравиметрические наблюдения** выполнены с использованием автоматизированного относительного гравиметра Scintrex CG-5 Autograv. Наблюдения проведены вдоль субмеридионального профиля с шагом 20 м (всего 14 координатных пункта), проходящего через центр озера. Опираясь на полученный ранее опыт наледных гравиметрических работ [4], для достижения необходимой точности длительность измерений на каждом пункте превосходила 10 минут. Средняя квадратическая погрешность гравиметрической съемки составила  $\pm 0,02$  мГал ( $\pm 20$  мкГал).

Для обеспечения высокой точности вычисления аномалий поля силы тяжести в различных редукции работы обеспечены топогеодезической привязкой. Определение плановых координат и высот выполнено с использованием дифференциального приемника Trimble GNSS R8. Средняя квадратическая погрешность определения плановых координат и высот точек не превышает  $\pm 5$  см.

**Моделирование.** По результатам магнитометрических работ построена карта аномального магнитного поля озера Смердячье (Рис. 2). На ней отчетливо видна кольцевая двухзнаковая аномалия, проходящая вдоль кромки озера. Ширина кольцевой аномалии составляет 15 – 20 метров. В центральной части площади присутствует положительная аномалия амплитудой 15 нТл. К северо-востоку от нее локализуется незначительное понижение поля. В районе работ нормальное магнитное поле имеет наклонение около  $70^\circ$ . Наблюдаемое соотношение положительных и отрицательных частей описанных аномалий позволяет предположить наклонную остаточную намагниченность источника.

Основываясь на концептуальной модели астроблемы [5], построена магнитная модель, состоящая из магнитного слоя, имеющего форму полусферы, мощностью 35 метров, внутреннего сферического слоя и центрального тела – ударника, расположенного в фокусе полусферы. В результате интерактивного решения обратной задачи в программном комплексе GravMagInv3D [6] определено, что внешняя полусфера имеет намагниченность  $0 - 0,17$  А/м с наклонением  $30^\circ$  и склонением  $60^\circ$ . Внутренняя сфера соответствует образовавшейся в результате удара котловине, которая приобрела намагниченность порядка 0.1 А/м. Ударник представляет собой тело, близкое по форме к эллипсоиду размерами  $15 \times 15 \times 30$  м. Глубина залегания центра эллипсоида составляет

50 м, а его залегание имеет небольшой наклон. Намагниченность ударника составляет 3.5 А/м. Направления намагниченности ударника, внутренней и внешней полусфер совпадают.

На основе трехмерной модели распределения намагниченности составлена двухмерная плотностная модель вдоль профиля гравirazведки. Профиль гравиметрической съемки прошел в стороне от места предполагаемого ударника, поэтому на разрезе проявлены только две полусферы пород, метаморфизованные под действием ударной волны. Оцененное уплотнение метаморфизованных пород составляет 0.2 – 0.8 г/см<sup>3</sup>.

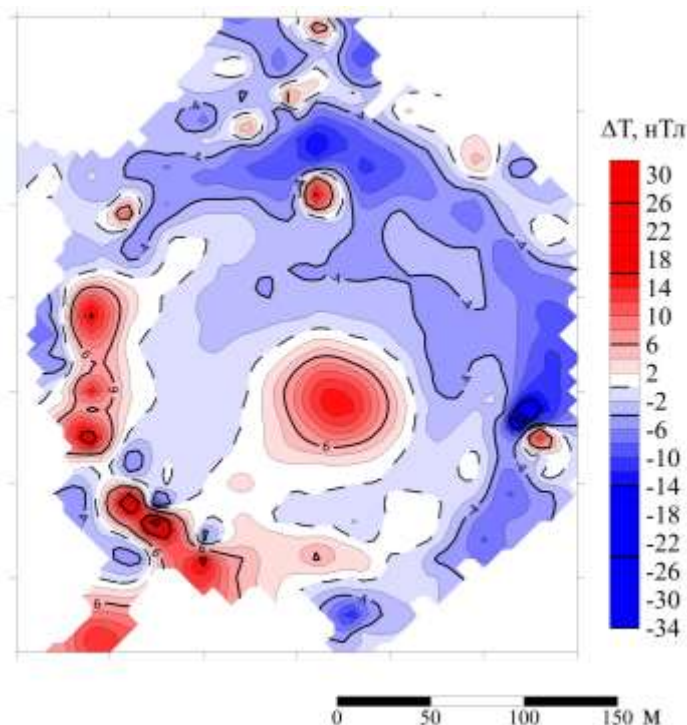


Рис. 2 Аномальное магнитное поля озера Смердячье

**Заключение.** Округлая форма озера, рельеф вала и котловины, а также изменения горных пород и минералов и изменения в первичном залегании приповерхностных горизонтов пород, определённые предшествующими работами исследователей, позволяют судить об импактной природе происхождения озера Смердячье.

Результаты магнитометрических работ 2024 года показали, что форма аномалий магнитного поля отвечает форме и природе метеоритного кратера. Выполненное моделирование показало, что источники аномалий магнитного поля обладают остаточной намагниченностью, направление которой не совпадает с внешним магнитным полем, а сонаправлено с направлением Шатурской группы озер. Мы предполагаем, что полученные значения склонения (60°) и наклонения (30°) ударника метеорита определяют параметры его конечной траектории – направление движения и угол падения соответственно.

Таким образом аномалии магнитного поля, модель, построенная по ним, подтверждают метеоритную природу происхождения озера Смердячье.

#### Литература:

1. Енгальчев С. Ю. Метеоритный кратер на востоке Московской области // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Сер. 7. 2009. Вып. 2. С. 3–11.
2. Маккавеев А.Н, Гуринов А.Л., Александровский А.Л., Шварев С.В., Луговой Н.Н., Караваев В.А. Астроблемы на востоке Московской области // Земля и Вселенная. 2023. № 5. С. 31 – 43. DOI: 10.7868/S0044394823050031.
3. Озеро Смердячье – подмосковная Хиросима // ГЕОХИ РАН. Лаборатория метеоритики. Интернет-ресурс (ссылка актуальна на 19 февраля 2024 г.): <https://www.meteorites.ru/menu/encyclopaedia/smerdyachee.html>
4. Шклярук А.Д., Кузнецов К.М., Арутюнян Д.А., Лыгин И.В. Особенности высокоточной гравиметрии на льду // Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии Том III (III). — Т. 3. — ООО ПолиПРЕСС Тверь: 2020. — С. 192–193.
5. French В.М. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures – 1998. – LPI Contribution N 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 С.
6. Лыгин И.В., Чепиго Л.С., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Булычев А.А. Методика геоплотностного и геомагнитного интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава априорной геолого-геофизической информации // Геофизика. — 2022. — № 6. — С. 57–70.



# МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ НАЗЕМНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ ПРИ ПОИСКЕ АЛМАЗНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ

Л.А. Золотая<sup>1</sup>, К.М. Кузнецов<sup>1</sup>, А.А. Фадеев<sup>1</sup>, И.В. Лыгин<sup>1</sup>, Т.Б. Соколова<sup>1</sup>,  
М.В. Коснырева<sup>1</sup>

*1 - Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

Кимберлитовые трубки или трубки взрыва (диатремы) – конусовидные магматические тела, которые образуются при прорыве богатой летучими компонентами магмы на земную поверхность или при контакте магмы с горизонтами подземных вод за счет выделения большого объема газов и их взрывном высвобождении из недр (рис. 1).



*Рис. 1 Кимберлитовая трубка «МИР» и ее структурная схема*

Известно, что более половины из 1200 кимберлитовых тел Якутии и практически все кимберлитовые тела Архангельской области обнаружены при помощи магниторазведки. Однако, при безусловно высоких показателях эффективности магнитного метода, особенно на стадиях поисков кимберлитов, в различных ситуациях проявляются факторы, ограничивающие возможности магнитометрии. В первую очередь, это связано с тем, что повышенная намагниченность кимберлитовых тел, а тем более, аномально высокая намагниченность, не является генетически неотъемлемым свойством алмазоносной породы. Этот тезис прекрасно подтверждается феноменом Накынского (Средне-Мархинского) кимберлитового поля, высокоалмазоносные объекты которого не нашли отражения в материалах современных магнитных съемок [1, 2].

В августе 2023 года, сотрудниками кафедры геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета согласно договорным отношениям с Вилуйской геологоразведочной экспедицией с (ВГРЭ) АК «АЛРОСА» (ПАО) была выполнена. Экспертиза методики и технологии полевых и камеральных высокоточных магниторазведочных работ масштаба 1:5000. Основной задачей выполнения работ являлся полноценный контроль за проведением всего цикла магнитометрических работ, способствующих при будущих работах

повышению точности магнитных полевых измерений полного вектора магнитной индукции  $T$  до значений среднеквадратичной погрешности менее  $\pm 1$  нТл. Для экспертизы были предложены опытные участки, расположенные в пределах кимберлитовых полей двух объектов «Усть-Накынский» и «Мирнинский». На этих участках ВГРЭ АК «АЛРОСА» в течение последних трех лет были проведены опытно-методические работы, которые не дали существенного результата в поиске ошибок, понижающих точность детальных магнитных съемок.

Супервайзерский контроль выполнялся сотрудниками лаборатории гравиразведки и магниторазведки в несколько этапов в полевых выездных и камеральных экспертных работах. На первом этапе, непосредственно на площади работ в Якутии, проведена проверка наличия действующих сертификатов магнитометров и выполнен анализ результатов профильных наземных магнитометрических опытно-методических работ (ОМР). Были изучены магнитные измерения в различных модификациях: без предварительно подготовленной топосети (без рубки профилей) и вдоль просек разными моделями магнитометров (Geometrics, MaxiMag, POS-1), прошедших сертификацию. На этом этапе проведен системный анализ данных измерений магнитного поля с навигацией по профилям приемниками ГНСС типа Garmin, по 3 методикам:

- В непрерывном режиме с интервалом 1 сек., с записью координат встроенным GPS-приемником, с минимальным отклонением от проектного положения профиля;
- В точечном режиме, с записью координат встроенным GPS-приемником, точно в проектных точках;
- В непрерывном режиме или в режиме «стой – иди» с геодезическими GPS-приемниками фирмы Topcon HiperSR.
- На втором этапе дополнительно проведена экспертиза приборов, используемых для учета магнитовариационных данных на станциях (МВС):
- Проведен анализ данных, полученных на МВС за все время проведения ОМР.
- Проанализированы результаты синхронной записи МВС для четырех приборов: Base Mag 2012, Maxi Mag R9 и Maxi Mag S4.

Дополнительно проведен анализ магнитного поля полного вектора магнитной индукции  $T$  вдоль эталонного профиля (№ 02), при прямом и обратном проходах всеми сертифицированными типами магнитометров, что позволило оценить среднеквадратическую погрешность (СКП) всех измерений и определить систематические расхождения при встречных курсах. В заключении проанализировали результаты измерений магнитного поля площадных работ на участке ОМР и рассчитали СКП измеренных значений поля  $T$  по контрольным наблюдениям.

По выполненным супервайзерским полевым работам были сделаны выводы, что значения погрешности съемок ОМР без предварительно подготовленной топосети, варьируют в пределах

от 0,37 нТл до 4,46 нТл. Минимальное значение СКП достигается при измерениях по просекам из-за высокой точности координатной привязки профилей ОМР. Для заказчиков работы сформулированы рекомендации по выбору оптимальной методики магнитометрических работ на площади ОМР, позволяющих гарантировано обеспечить точность магнитных съемок не менее  $\pm 1$  нТл.

На третьем этапе исследований были решены задачи по оптимальности расположения магнитовариационных станций (МВС) и методике регистрации солнечно-суточных вариаций на площади работ, оптимальной ориентировки оси магниточувствительных элементов (датчика) магнитометров, методике наблюдений на контрольном пункте (КП), а главное осуществление контроля отсутствия у оператора магнитных предметов.

На четвертом этапе, проводился непосредственный контроль процесса полевых магниторазведочных работ, по результатам которого, несмотря на высокое качество выполняемых работ ВГРЭ АК «АЛРОСА», накопленный авторами статьи опыт проведения прецизионных магнитных съемок, позволил сформулировать позиции, более внимательное отношение к которым может значительно повысить качество выполняемых магнитных съемок и сформулировать ряд выводов:

**1 вывод** - Увязка уровней рабочих магнитометров по серии измерений на одном КП не позволяет полностью устранить девиационные помехи, проявляющиеся в профильных аномалиях. Возможным решением этой проблем может быть увязка приборов по эталонному профилю, съемка на котором выполняется в режиме, совпадающим с рабочим. Такой подход надежно обеспечивает внутренний контроль работы полевых магнитометров и увязки результатов измерений по всей площади.

**2 вывод** – Важным моментом является соблюдение единой высоты наблюдений – положения МЧЭ (датчиков) рабочих магнитометров, связанное с ростом операторов или снежным покровом.

**3 вывод** – Обязателен контроль оптимального положения оси измерительных датчиков используемых магнитометров относительно направления полного вектора нормального магнитного поля  $T$ , т.к. в полевых условиях супервайзером из МГУ было зафиксировано различное положение датчика МВС и рабочих полевых магнитометров на 180 градусов (рис. 2). Требуется дополнительные опытные работы, позволяющие исключить систематические погрешности на этапе обработки



*Рис. 2 Различное положение магнитных датчиков на МВС и полевом магнитометре*

данных и введения поправок за магнитные вариации.

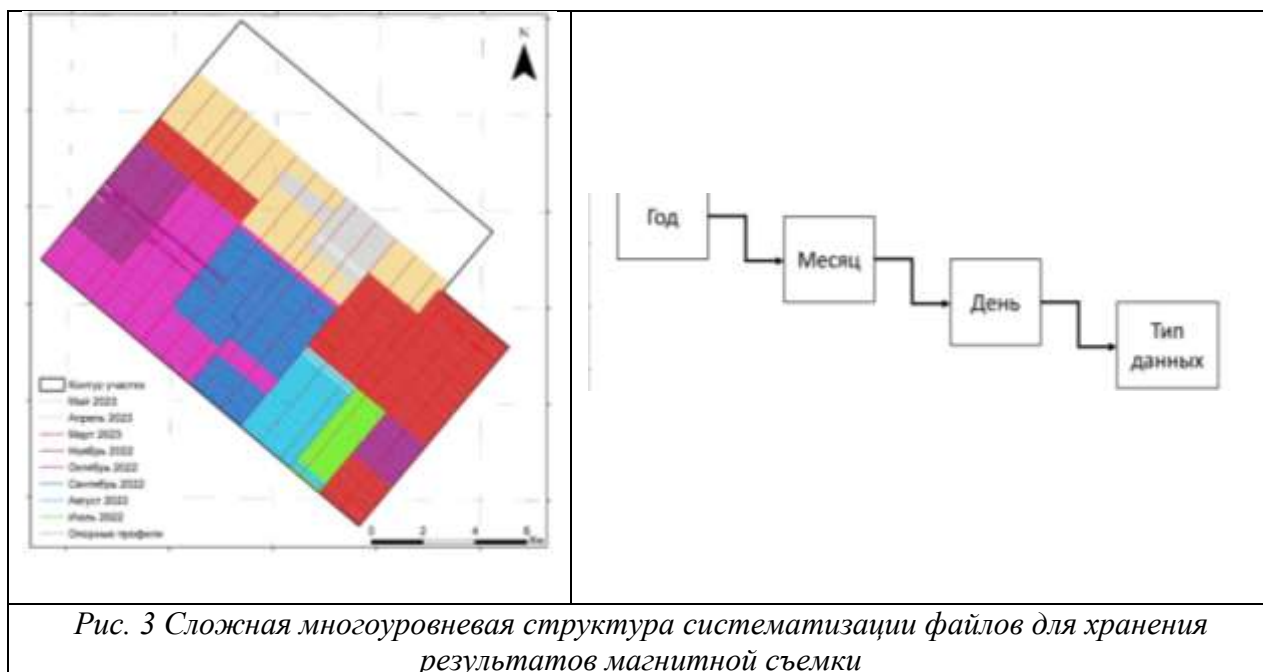
**4 вывод** – Обязательно рекомендуется регулярное (перед каждым маршрутом) снятие азимутальных кривых используемых магнитометров для контроля отсутствия у оператора магнитных предметов, вместо визуального осмотра.

Проведение супервайзерских полевых работ позволяет считать, что лучшую сходимость данных демонстрируют магнитометры **Geometrics** ( $\pm 0.17$  нТл) и **MMPOS-1** ( $\pm 0.70$  нТл). Установлены значимые величины девиационной составляющей (ошибка за встречный курс) при работах со всеми магнитометрами, которую обязательно необходимо учитывать при обработке данных. Поэтому для выявления и оценки девиационной помехи необходимы ежедневные измерения встречными курсами в рабочем режиме съемки. Магнитную съемку предпочтительно выполнять по заранее подготовленной сети профилей.

В связи с высокой амортизацией магнитометров Geometrics, мы рекомендуем обратить внимание на современные модификации российских магнитометров марки MMPOS, как возможной альтернативы зарубежным магнитометрам. Для снижения систематических погрешностей измерений необходимо дополнить или заменить ежедневные измерения на КП сериями измерений вдоль эталонного профиля в режиме, совпадающем с рабочим режимом. Для более надёжного определения условного уровня магнитного поля необходимы измерения на МВС на протяжении полных суток. При перемещении МВС (с переездом лагеря, например) необходима увязка уровней магнитного поля на основании синхронной записи в точках установки. Для надежной увязки площадей, выполняемых в разные сезоны, необходимы значительные перекрытия опорных профилей с определением координат всех закрепленных пикетов.

На основе проделанной экспертизы договорных работ авторами подготовлена для ВГРЭ АК «АЛРОСА» новая редакция «Методических рекомендаций по проведению высокоточных магнитных съемок» при изучении кимберлитовых полей Западной Якутии.

Сложная многоуровневая структура из вложенных файлов хранения результатов магнитной съёмки в масштабе 1:5000 в объеме 20 млн. измерений потребовала значительного времени для формирования баз полевых данных и измерений на МВС. На завершающем этапе обработки данных магнитных съемок на участке Хоту-Куель, выполненной ВГРЭ АК «АЛРОСА», эксперты рекомендуют оптимизировать структуру хранения базы данных. Фрагментарный характер и всесезонность съемок существенно осложняет обработку, а предложенная (рис. 3) схема рационально упрощает решение этой задачи по вычислению аномальных магнитных полей и оценки качества выполненных съемок.



На завершающем этапе, авторами статьи проведены исследования, направленные на выделение локальных аномалий целевого типа на фоне линейных зон высокого градиента в исходных магнитных полях и их трансформациях. На изученной площади рекомендуется выполнять направленную полосовую фильтрацию с помощью косинус-фильтров, практически не образующих ложные аномальные магнитные эффекты. На конкретных участках проиллюстрировано, что данные трансформации позволяют наиболее эффективно выполнить морфологический анализ пространственного положения магнитных аномалий предположительно кимберлитовой природы.

Исследования выполнены в рамках договора № 9412 от 20 июня 2023 с Виллойской геологоразведочной экспедицией (ВГРЭ) АК «АЛРОСА» (ПАО) (г. Мирный).

### Литература

1. Цыганов В.А. Классификация и исследование отказов магнитометрического метода поисков кимберлитов. М., ФГУП Аэрогеология, 1998, 25 с.
2. Бондаренко С.В. Отчет о проведении высокоточной аэромагнитной съёмки в комплексе с наземными детализационными геофизическими работами в пределах Виллойско-Мархинской минерагенической зоны в 2008-2013 гг (ОАО «Алроса»). УДК 550.838:553.81(571.56), государственный регистрационный № 45-08-21/34

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ И ИЗОМЕТРИЧНЫХ АНОМАЛИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

К.М. Кузнецов <sup>1</sup>, А.Д. Шклярук <sup>1</sup>

*1 – Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

## **Введение**

При интерпретации потенциальных полей (гравитационного и магнитного) в первую очередь решается задача их качественного анализа и составления схем структурных особенностей полей, в том числе и связанных с тектоникой района. В частности, для этого необходимо выделение линейных и изометричных аномалий. Часто такие структуры полей оказываются наложенными друг на друга, имеют сложную морфологию, осложнены техногенными помехами и шумом, что заметно усложняет процесс их автоматизированной интерпретации.

Можно выделить несколько подходов к выделению линейных и изометричных аномалий потенциальных полей:

- Экспертная интерпретация (ручная);
- Корреляционный анализ;
- Машинное обучение.

Во всех этих методах активно применяется формальная и неформальная фильтрация в действительной и частотной областях.

В данной работе рассмотрен метод по локализации линейных и изометричных аномалий, основанный на сверточных нейронных сетях (СНС). При решении данной задачи созданы две нейронные сети: 1) для локализации линейных аномалий и 2) для локализации изометричных аномалий.

## **Подготовка обучающей выборки**

Для создания нейронной сети, выбора ее оптимальной архитектуры и определения весов нейронов необходимо создание обучающей выборки. Подходы к созданию выборки для обучения СНС для локализации изометричных и линейных аномалий [1] схожи между собой.

Рассмотрим пример для изометричных аномалий, соответствующих гравитационному полю астроблем. Такие поля имеют кольцевую структуру двухзнаковой аномалии. Обучающая выборка построена на основе синтетических моделей, каждая из которых (Рис. 1В) создавалась в два этапа. Первый этап – создание модели эффекта астроблемы. Для этого выбрана 3

вертикальная производная гравитационного поля сферы, как наиболее близкое по морфологии (Рис. 1А). Параметры сферы задавались случайным образом. Второй этап – к эффекту добавлялся случайная помеха (Рис. 1Б). В качестве выходных данных создана матрица, в которой искомый объект отмечен «1» (Рис. 1Г). Всего для обучения СНС было создано более 10 наборов синтетических данных, включающих в себя от 500 до 1000 моделей.

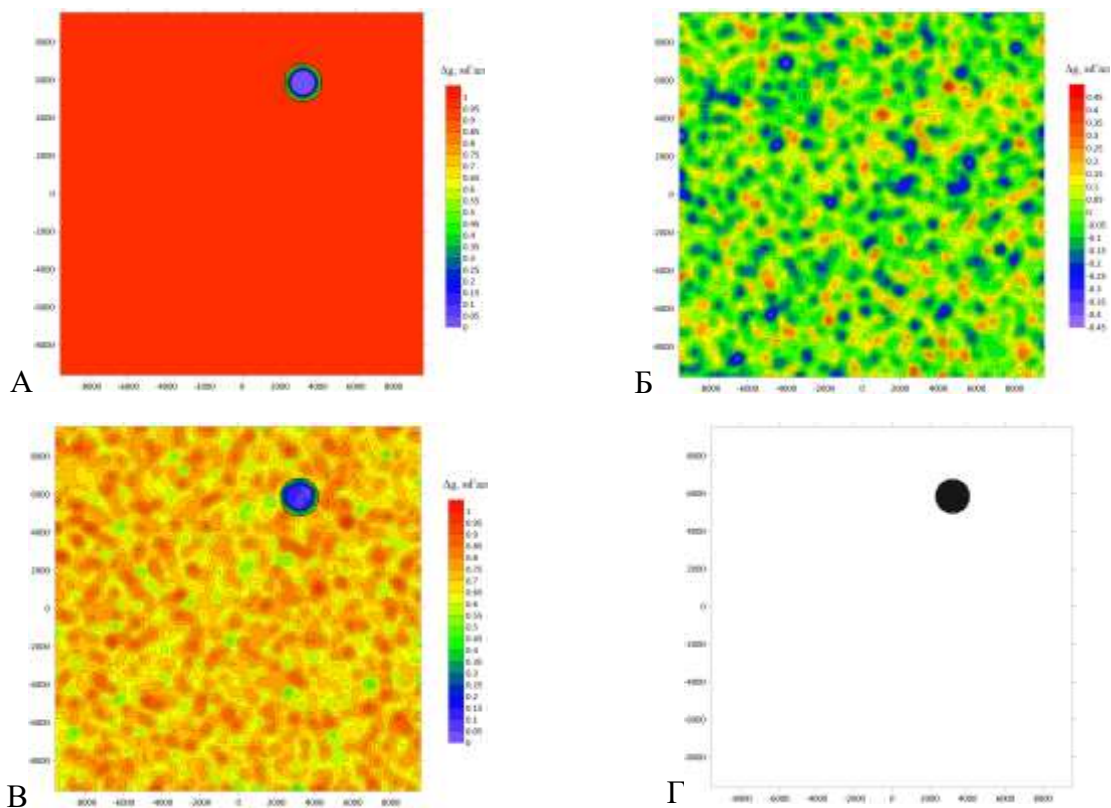


Рис. 1 Пример модели из обучающей выборки. А – третья производная гравитационного поля сферы; Б – случайный шум; В – итоговая модель для обучения СНС; Г – положение сферы, используемое для обучения СНС

### Выбор оптимальной модели сверточной нейронной сети

После получения обучающей выборки необходимо выбрать наиболее эффективную структуру СНС. Поставленную задачу можно отнести к задаче сегментации изображения. В настоящее время в различных областях науки для решения задачи сегментации изображения используется архитектура сверточной нейронной сети – U-Net, созданная в 2015 году для сегментации биомедицинских изображений в отделении Computer Science Фрайбургского университета [2].

Архитектура сети представляет собой последовательность слоев свертки и пулинга (Рис. 2 Справа), которые сначала уменьшают пространственное разрешение изображения, поданного на вход, а затем увеличивают его, предварительно объединив с данными исходного изображения и пропустив через другие слои свертки. Таким образом, сеть выполняет роль своеобразного фильтра.

Изначальные веса U-Net определяются случайным образом. Для упрощения обучения и получения более качественного результата можно воспользоваться моделями глубокого обучения, доступными вместе с предварительно обученными весами. В языке программирования Python существует множество моделей, обученных сегментировать изображения: VGG, ResNet, Inception, Efficient и др. Все они обучены на выборке, состоящей из более чем 14 миллионов изображений, принадлежащих к 1000 классам. Эти сети различаются между собой количеством слоев свертки и пулинга, но принцип действия у них схож. Для задачи выделения линейных и изометричных аномалий, опытным путем, выбрана сеть VGG-16 (Рис. 2 Слева), которая состоит из 16 настраиваемых параметров: 13 слоев свертки и 3 полносвязных слоев. Также в данной сети присутствует 5 слоев пулинга, которые уменьшают изображение вдвое [3].

Для построения собственной СНС типа U-Net с предобученными весами сети VGG - 16 случайные веса левой части (декодер) сети U-Net заменены на предобученные веса сети VGG-16 (Рис. 2). СНС дообучалась на составленной выборке (Рис. 1). При обучении объем отложенной выборки для оценки точности составлял 20% для каждого набора обучающей выборки.

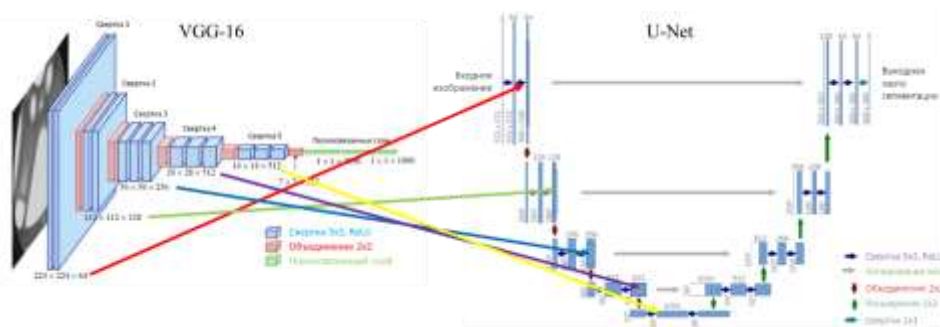


Рис. 2 Итоговая модель сверточной нейронной сети, построенная для решения задачи выделения линейных и изометричных аномалий потенциальных полей

### Результат работы СНС на реальных данных

В качестве примера для отработки алгоритма выделения линейных аномалий были использованы карты аномального магнитного поля Баренцево-Карского региона. В этом регионе широко распространены дайки различного простирания, которые проявляются в магнитном поле в виде линейных аномалий [4]. Для проверки эффективности подхода выделения линейных аномалий на реальных примерах использовались, обученные на модельных примерах, сверточные нейронные сети. Для Баренцева моря рассматривалась площадь  $50 \times 50$  км, на которой в аномальном магнитном поле отчетливо видны крупные дайки. На рисунке 3 представлено сравнение результатов применения СНС LinearDetect (черный цвет) и результатов (желтый цвет), полученных в результате комплексной интерпретации, описанной в работе [5].



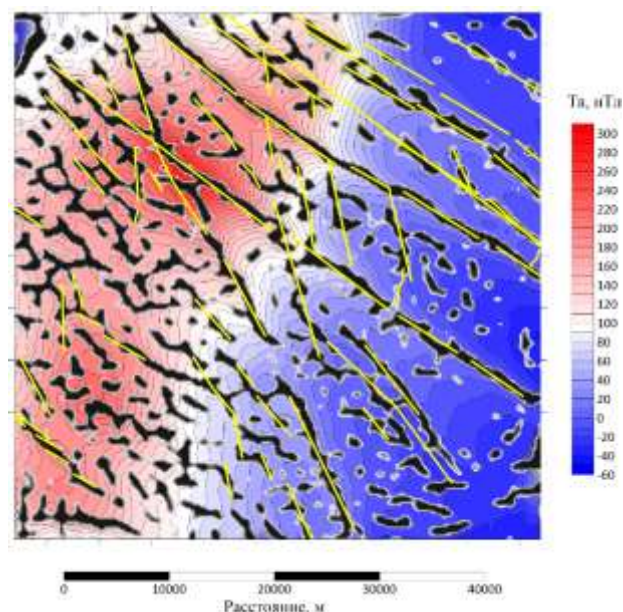


Рис. 3 Оси линейных аномалий магнитного поля, приуроченных к дайковому комплексу, полученные по результатам использованием СНС LinearDetect (черный цвет) и по результатам комплексной интерпретации [5] (желтый цвет)

В качестве примера для отработки алгоритма локализации изометричных аномалий рассмотрен участок Луны с 50 по -50 широту, на котором представлено аномальное гравитационное поле в редукции свободный воздух. Главной особенностью гравитационного поля Луны является наличие масконов, которые представляют собой большие отрицательные и положительные аномалии силы тяжести в редукции свободный воздух. На рисунке 4 представлен результат работы сверточной нейронной сети CircleDetect, обученной на синтетических моделях.

По результатам работы СНС можно сказать, что она выделяет положение масконов размерами от 30 до 150 км., представленных в обучающей синтетической выборке. Для создания более полной схемы масконов Луны, необходимо увеличение синтетической выборки для обучения СНС. Возможны два пути: 1) создание различных моделей нейронных сетей для выделения структур, имеющих различные размеры; 2) создание универсальной нейронной сети.

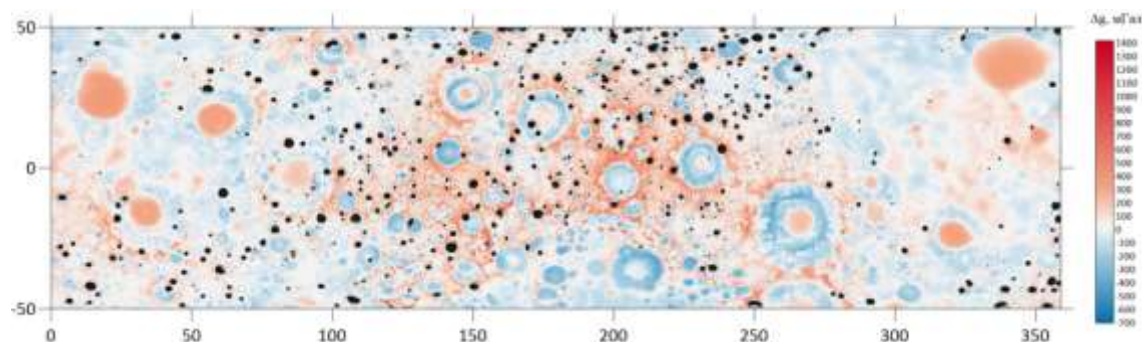


Рис. 4. Аномальное гравитационное поле в редукции свободный воздух с нанесённым результатом работы сверточной нейронной сети CircleDetect (черным цветом)

### Заключение

В настоящее время активно развивается тематика искусственного интеллекта. Применение алгоритмов на основе нейронных сетей позволяет решать широкий круг задач геофизики. Однако их применение в обработке и интерпретации геопотенциальных полей встречается редко.

В ходе исследования были построены и протестированы на модельных и реальных данных сверточные нейронные сети LinearDetect и CircleDetect, которые могут быть использованы для решения задачи локализации линейных и изометричных аномалий геофизических полей. Приведенные примеры для Баренцево-Карского региона и Луны позволяют предположить, что алгоритмы выделения линейных и изометричных аномалий магнитного и гравитационного полей могут быть инструментами качественной интерпретации и использоваться для построения геолого-геофизических моделей.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Междисциплинарных научнообразовательных школ Московского университета в рамках Соглашения № 23- Ш01- 13.

#### Литература:

1. Шклярук А. Д., Кузнецов К. М., Лыгин И. В., Арутюнян Д. А. Применение сверточных нейронных сетей для выделения линейных аномалий магнитного поля Баренцево-Карского региона // Труды XII Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU)-2023. — Т. 4. — ООО ПолиПРЕСС Тверь: 2023. — С. 431–437.
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9351. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)
3. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), 1–14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
4. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Кривошея К.В. Картирование магматических комплексов по данным гидромагнитных съемок Баренцевоморского региона // Физика Земли. – 2023. – №4. – С. 96-114.
5. Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю. и др. Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геологоразведочных работ // Геология нефти и газа №2 2020. С. 107-120.

ОБРАБОТКА АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ,  
ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ  
С НАЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТИПА ДЛИННЫЙ КАБЕЛЬ

М.Н. Марченко<sup>1</sup>, И.Н. Модин<sup>1</sup>, А.Ю. Паленов<sup>1</sup>, Н.Л. Шустов<sup>1</sup>, С.И. Волков<sup>1</sup>

*1 – Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

**Введение**

Бурное развитие технологий производства и применения беспилотных воздушных судов (БВС) привело к непрерывному росту спроса на разнообразную полезную нагрузку для летательных аппаратов. Геофизические методы – одно из наиболее перспективных направлений.

Внедрение аэромобильных модификаций геофизических методов позволяет значительно повысить производительность работ, выполнять наблюдения в труднодоступных местах. При этом, в отличие от аэрогеофизики на пилотируемых аппаратах, применение БВС позволяет заметно уменьшить доступную высоту датчиков и актуальное расстояние между профилями наблюдений (до первых метров), радикально снизить стоимость работ.

Таким образом, использования БВС существенно расширяет сферу применения аэромобильных геофизических методов, вплоть до решения археологических задач, выполнения съемок на небольших участках (площадью от первых гектаров с линейными размерами от первых сотен метров).

При этом, размещение геофизической аппаратуры на БВС требует серьезного ограничения массогабаритных характеристик. Вес бортовой аппаратуры необходимо минимизировать. Чем больше вес приборов, тем тяжелее класс требуемого летательного аппарата, что заметно сказывается на стоимости приобретения и эксплуатации БВС и, в итоге, на стоимости работ.

В последние годы многими организациями и исследователями высокими темпами ведутся работы по адаптации бесконтактных электроразведочных методов для применения на БВС. В основном реализуют методы МПП, ЧЗ, многочастотное индукционное профилирование, СДВР. Возбуждение первичного поля выполняют бортовыми (магнитный диполь) или наземными установками (заземленная линия, незаземленная петля, магнитный диполь, удаленная радиостанция). Размещение источника электромагнитного поля на борту БВС значительно увеличивает вес бортовой аппаратуры, но позволяет отказаться от наземных источников, что повышает мобильность применения такой технологии съемки.

## Аппаратурно-программный комплекс «АЭРОН»

Аппаратурно-программный комплекс «АЭРОН» разрабатывается для выполнения аэроэлектроразведочных наблюдений индукционными методами (метод бесконечно длинного кабеля, метод незаземленной петли, индукционного профилирования) с размещением измерительной установки на БВС среднего класса (с массой полезной нагрузки от 2,5 кг). Возбуждение первичного поля производится наземными источниками.

В настоящее время идет работа и отладка действующего макета аппаратуры.

Измерительная часть аппаратурно-программного комплекса размещается на подвижной (аэромобильной) платформе (см. Рис. 1) и выполняет регистрацию:

- 3-х компонент (X, Y и Z) напряженности переменного магнитного поля,
- 3-х компонент (X, Y и Z) градиента напряженности переменного магнитного поля,
- углов крена, тангажа и рысканья измерительной платформы.
- координат положения измерительной платформы (с помощью GPS/ГЛОНАСС-приемника).

Возбуждение первичного поля производится наземными установками типа: заземленная линия, незаземленная петля или вертикальный магнитный диполь.

Регистрация результатов наблюдений выполняется на жесткий диск бортового компьютера. Обработка полученных данных производится в камеральных условиях.

Первичная обработка заключается в детектировании сигнала рабочей частоты, вычислении компонент  $H_z$  и  $H_r$  напряженности и градиента переменного магнитного поля, ввода поправок за наклон (крен и тангаж) измерительной системы, пространственная привязка полученных результатов.

### Обработка результатов наблюдений

Как правило, при обработке результатов измерений переменного магнитного поля в индукционных электроразведочных методах применяют разные подходы.

- Вычисление эффективного электрического сопротивления по измеренным значениям  $H_z$  и  $H_r$  с учетом геометрии питающей линии, положения точки наблюдений и рабочей частоты [2, 3]. Построение карт эффективного сопротивления.
- Решение прямой одномерной задачи в отношении компонент  $H_z$  и  $H_r$  и выполнение инверсии измеренных данных [4]. Построение разрезов и карт распределения электрических сопротивлений. Детальность и разрешение по глубине зависит, в числе прочего, от набора и диапазона используемых рабочих частот.

- Вычисление инвариантных параметров измеренного поля, имеющих связь с электрическим сопротивлением изучаемого разреза [4]. Построение карт значимых характеристик поля.
- Расчет первичного поля кабеля и вычисление аномального поля, имеющего очевидную связь с электрическим сопротивлением изучаемого разреза [1, 2, 3, 5]. Построение карт компонент аномального поля.

При обработке данных измерений, полученных с аппаратурно-программным комплексом «АЭРОН» применялись подходы:

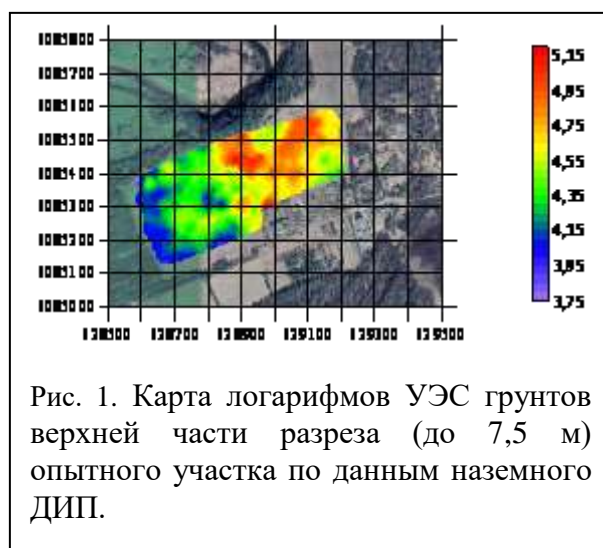
- вычисление отношения  $Hr/Hz$  измеренного поля;
- вычисление аномального поля;
- расчет эффективного электрического сопротивления.

### Опытный участок

Опытные аэроэлектроразведочные наблюдения выполнялись в разные годы на Александровском полигоне в Калужской области. Представленные результаты получены в результате площадных наблюдений на участке Александровского плато. Строение опытного участка хорошо изучено наземными геофизическими методами.

Изучаемая территория характеризуется значительными изменениями строения верхней части разреза. В восточной и северо-восточной части участка покровные отложения мощностью до 10-15 метров представлены песками, в основании песков залегают суглинки. Мощность песков уменьшается к западу и юго-западу, где пески практически полностью выклиниваются (см. Рис. 1).

Питающая линия располагалась южнее участка на удалениях от 100 до 300 м (в разные годы) от крайнего южного профиля. Измерения выполнялись на частотах от 625 Гц до 16 кГц (625, 1250, 2500, 8000 и 16000 Гц). Высота положения датчика 20-25 метров. Скорость полета БВС  $5 \div 7$  м/с.



### Анализ отношения Нг/Hz измеренного поля

Вычисление отношения Нг/Hz измеренного поля применялось к результатам разных лет, полученных с различной рабочей частотой, разными генераторами и модификациями приемной аппаратуры.

По нашему мнению, отношение Нг/Hz наилучшим образом применимо к данным, полученным в средней зоне, где отношение горизонтальной компоненты нормального поля к вертикальной не превышает 10. В наших условиях это соответствует частотам 1250 и 2500 Гц. Наиболее представительная карта получена на частоте 2500 Гц.

Полученные результаты носят качественный характер, корректно отображая изменения УЭС грунтов (или мощности песков) в плане (см. Рис. 2).

На частотах более 8 кГц результативность отношения Нг/Hz падает (теряется связь с разрезом), что связано с началом перехода в дальнюю зону.

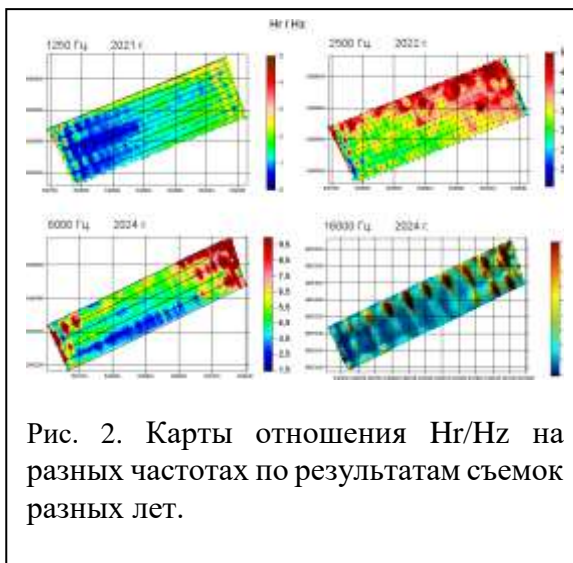


Рис. 2. Карты отношения Нг/Hz на разных частотах по результатам съемок разных лет.

### Анализ аномального поля

Расчет аномального поля выполняется путем вычитания из измеренных значений вычисленного поля питающей линии. Расчет поля кабеля производился прямым численным методом. Учет точного значения тока в АВ, влияния погрешностей коэффициентов усиления измерительной системы выполнялся путем подбора масштабного коэффициента между измеренным полем и расчетным полем кабеля:  $H_{г \text{ аномальное}} = H_{г \text{ измеренное}} - K \cdot H_{г \text{ кабеля}}$ , где K - масштабный коэффициент.

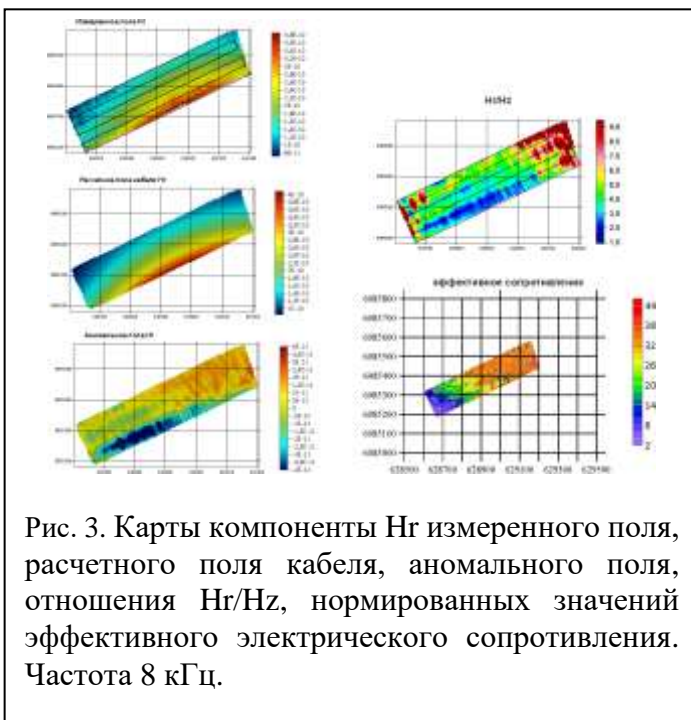


Рис. 3. Карты компоненты Нг измеренного поля, расчетного поля кабеля, аномального поля, отношения Нг/Hz, нормированных значений эффективного электрического сопротивления. Частота 8 кГц.

## **Анализ эффективного электрического сопротивления**

Вычисления эффективного электрического сопротивления выполнялось по формуле, предлагаемой Инструкцией по электроразведке для обработки данных БДК.

Полученные результаты в целом адекватно отображают распределение УЭС грунтов в плане (см. Рис. 3).

### **Заключение**

Обработка результатов наблюдений методом длинного кабеля в аэромобильном варианте возможна несколькими способами.

В условиях средней зоны (невысоких частот и разносов) карты отношений  $H_r/H_z$  пригодны для качественной оценки распределения УЭС грунтов

Перспективным представляется вычисление аномального поля  $H_r$ , которое работает и в средней и в дальней зоне. Полученные результаты пригодны для качественного анализа. Есть основания предполагать, что с повышением рабочей частоты чувствительность аномального поля к объектам поиска будет увеличиваться (с неизбежным уменьшением глубины проникновения поля за счет скин-эффекта).

Вычисления эффективного электрического сопротивления позволяет количественно оценить, если и не значения УЭС грунтов то, как минимум, их изменения по площади исследований.

### **Список литературы**

1. А.И. Заборовский. Электроразведка. 1963.
2. Инструкция по электроразведке. 1984.
3. Справочник геофизика. Электроразведка. Книга 1. Москва «НЕДРА». 1989.
4. Варианты легких беспилотных систем для электромагнитных профилирований и зондирований. А.В. Паршин\* (ИРНITU, ИГХ СО РАН), С.В. Яковлев (ИРНITU), Ю.А. Давыденко (ИРНITU, ООО «Гелиос»), А.С. Башкеев (ИРНITU), В.В. Винокуров (ИРНITU), С.В. Бухалов (ИРНITU). «Инженерная и рудная геофизика 2021» — Геленджик, Россия, 26 - 30 апреля 2021 г.
5. К применению БПЛА в электроразведке, влияние локальных объектов на магнитное поле линии АВ переменного тока. А.Д. Каринский, А.А. Иванов, И.А. Зуденков. ГЕОФИЗИКА 1.2024 Научно-технический журнал. ЕАГО.

# ФОРМИРОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД С ОРГАНИЧЕСКИМ ВЕЩЕСТВОМ СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИС

Б.А. Никулин<sup>1</sup>, Н.А. Скибицкая<sup>2</sup>, А.А. Никитин<sup>1</sup>

*1 – Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2-- ИПНГ РАН*

Для решения задач интерпретации данных ГИС в сложнопостроенных коллекторах с разделением общей пористости на ее составляющие необходимо расширять стандартный комплекс исследований путем привлечения современных методов каротажа. Параллельно совершенствуются и алгоритмы анализа данных, используя методы статистического многомерного анализа [1].

Отложения рассматриваемых месторождений представляют собой примеры сложнопостроенных коллекторов, состоящих из известняков и доломитов, ангидритов, заглинизированных в различной степени или их разностей с включениями битумоидов (ВМС). Структура пустотного пространства осложнена развитием микро- и макро- трещиноватости и вторичных процессов выщелачивания, кальцитизации, перекристаллизации и сульфатации. В таких условиях применение одномерной зависимости заведомо малоперспективно. Ниже приводится анализ вариаций вещественного состава пород, фациальных факторов, уточнение природы радиоактивности и ее связи с битуминозностью по всему продуктивному интервалу скважины с использованием данных лабораторных исследований кернов и ГИС.

На рис. 1 представлено 3-х мерное распределение ВМС гаммаметрии (ГК) по глубине скважины (Нм). Слабая корреляция наблюдается в верхней и нижней частях разреза. В верхней части (См,Art) эта связь положительна, а в нижней - отрицательна. Средняя часть разреза характеризуется отсутствием связи. На рис. 2 представлена дендрограмма (факторный анализ) с выделением трех действующих, взаимно-уточняющих геолого-геофизических моделей представленного разреза. ВМС наиболее связан с калием, торием и Gмин (песчано-глинистые слои) и в меньшей степени связан с ураном [2].



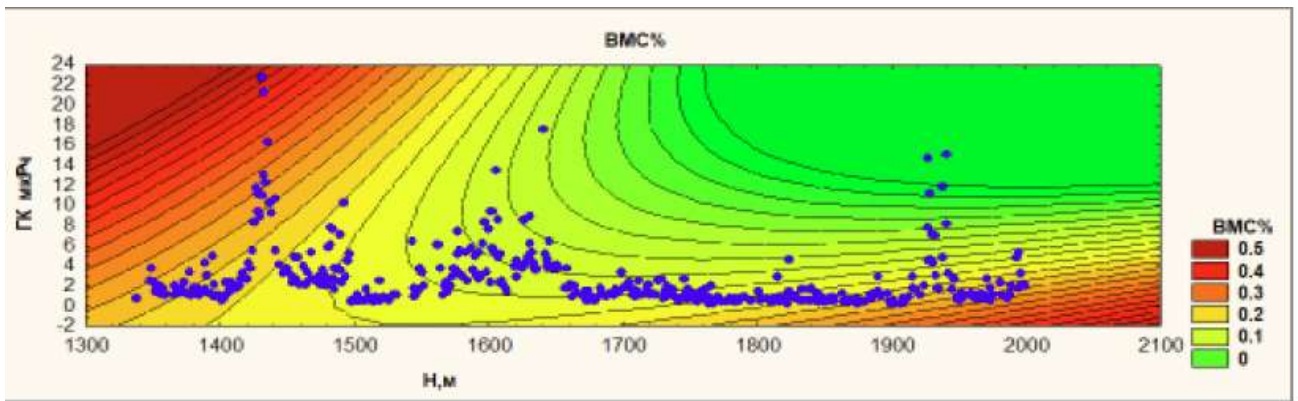


Рис. 1. 3-х мерное распределение ВМС гаммаметрии (ГК) по глубине скважины (Н,м).

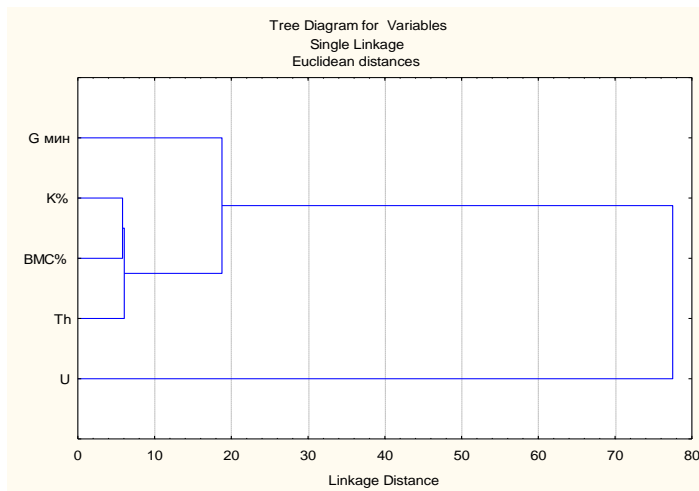


Рис. 2. Дендрограмма с выделением трех действующих, взаимно уточняющих геолого-геофизических моделей представленного разреза.

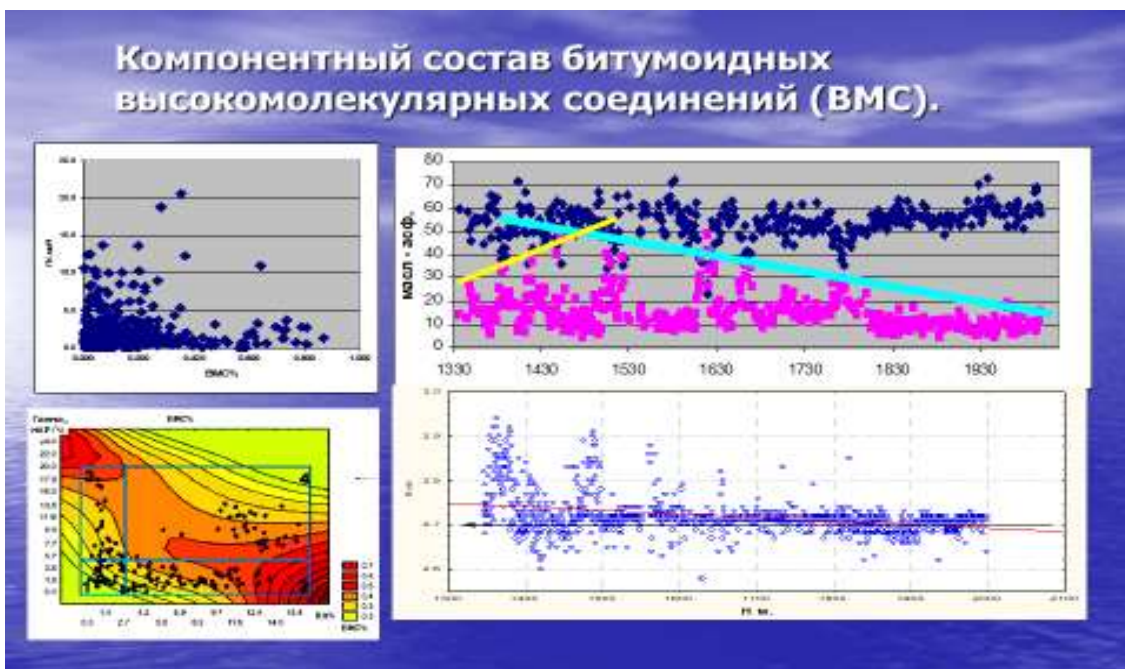


Рис. 3. Распределение Gмин по глубине скважины

**Оценка фацальной изменчивости пород геофизическими методами.** Как было отмечено выше, специфика поиска и разведки битумовмещающих объектов, оценка коллекторов и остаточного нефтегазосодержания обусловлена неравномерным распределением битумных концентраций, изначально связанных с рассеянным органическим веществом РОВ, которые определяются не только структурно-тектоническими факторами, но в большей степени неструктурными седиментационными и постседиментационными процессами. Современное представление условий осадконакопления связывается с относительными изменениями уровня моря в истории Земли, тектоники, цикличности поступления материала, климата, химии, биологии вод и др. Циклическое строение разреза во многих случаях выявляется по литологическому составу (например G мин). Диаграммы гаммаметрии (ГК) являются наиболее простыми и информативными в фацальном отношении. В ГК, помимо интегральной радиоактивности, часто измеряется спектральная характеристика излучения СГК с определением содержания калия, тория и урана. Как правило, с калиевой составляющей связывают содержание глинистых компонент, с торием - грубообломочных фракций, а с ураном к тому же и с органическими включениями в осадках [3]. Специалистами по фацальному анализу подмечено, что в любом цикле в центральной части наблюдается повышенная калиевая радиоактивность, а при наличии гумуса и урановая. В ряде случаев, в прибрежной зоне могут накапливаться грубые, содержащие торий, песчаники с повышением при этом общей радиоактивности. Это обуславливает процедуру анализа циклов через спектральный анализ гамма-излучения пород.

На рис.3 представлено распределение Gмин по глубине скважины. В верхней части разреза наблюдается ритмическое чередование ангидрита, доломита, известняков и их разностей с песчано-глинистыми включениями и гипса. Представленные породы обладают очень высокой неоднородностью. В нижней части это чередование практически отсутствует, а разрез сложен породами с Gмин менее 2,72 (известняки с песчано-глинистыми включениями и гипса).

**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.

Применение статистических методов обработки данных ГИС и формирование петрофизических моделей позволяет формализовать процедуру их сопоставления с геологическими моделями, используя последние в качестве обучающих [4].

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). Петрофизические исследования кернов выявили устойчивые связи проницаемости  $K_{пр}$  с пористостью  $Kп$  в четырех лито-фациальных зонах (F 1÷4) рис.4. При этом принимается что,  $Kп$  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 / 5/. Ниже приводятся результаты статистической обработки данных комплекса ГИС при сопоставлении с априорными фациальными зонами F (1÷4).

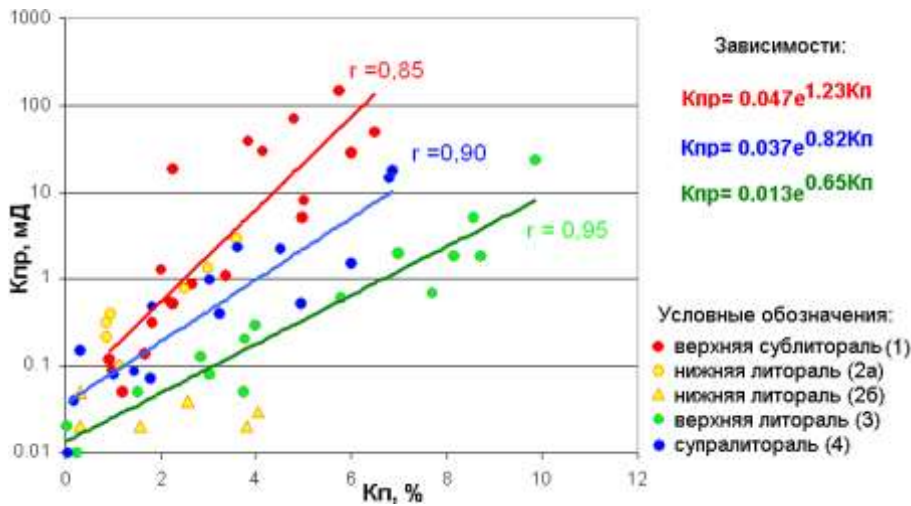


Рис.4. Дендрограмма с выделением двух действующих факторов (ГГКп -lgБК) и (W- Cгл),

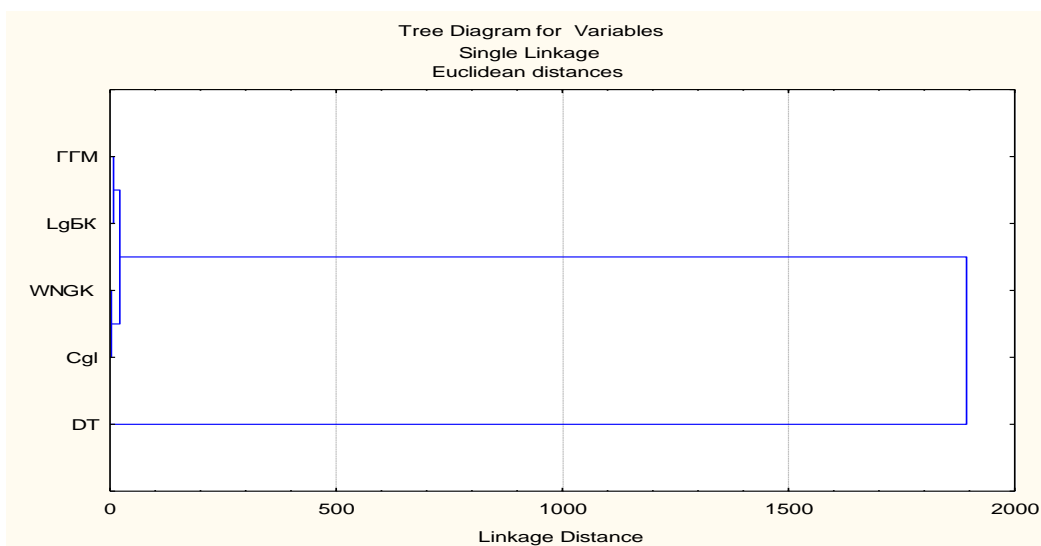


Рис. 5. Результат прогнозирования с коэффициентом корреляции 0.8(±0.2).

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:

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

где  $F(1\div 4)$  – тип фации. Применяя метод расчета многомерной регрессии [5] получен удовлетворительный результат прогнозирования с коэффициентом корреляции 0.8( $\pm 0.2$ ). 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.

На рис. 4 представлены дендрограмма (факторный анализ) с выделением двух действующих факторов (ГГКп -  $\lg$ БК) и (W - Сгл), уточняющие геолого-геофизические модели представленного разреза (рис. 5).

#### 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. М., Недра, 1989, 143с.
3. Титаева Н.А. Ядерная геохимия, Изд. Моск. ун-та, 2000, 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 // Нефтяное хозяйство, №8, 2008, 13-18с.

# СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ТРАДИЦИОННЫХ УСТАНОВОК МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Д.К.Большаков, И.Н.Модин

## Введение

За более чем столетнюю историю электрических зондирований на постоянном токе опробовано около ста различных электроразведочных установок (Szalai & Szarka, 2008). Некоторые из этих установок введены в практику полевых работ еще в прошлом веке, стали классическими и с успехом используются в настоящее время при многоэлектродных измерениях с современной аппаратурой метода электротомографии. Результаты опробования предлагаемых новых и усовершенствованных установок неизменно сравниваются с результатами этих классических, традиционных. Не претендуя на полноту охвата всей литературы по этой теме, отметим, что за последние тридцать лет количество публикаций, в которых приведено сравнение результатов инверсии традиционных установок между собой и с результатами предлагаемых новых установок возросло. Из приведенного в конце сообщения списка зарубежной литературы по одной публикации приходится на пятилетние периоды с 1990 по 1995 и с 1995 по 2000 годы. Далее две, четыре и пять публикаций в последующие пятилетние периоды (до 2005, 2010, 2015 гг.), соответственно. С 2015 по 2020 год доступны шесть зарубежных публикаций, а за последние пять лет удалось обнаружить три. Основой всех этих сообщений является выявление, в основном качественных, различий между моделями, полученными в результате инверсий, как правило, синтетических или, реже, синтетических и экспериментальных данных традиционных установок: Шлюмберже (S), Веннера (W), дипольной (D), трехэлектродной (Т). Интересно отметить, что до 2009 года результаты подобного рода исследований опубликованы дуэтами авторов (Xu & Noel, 1993; Loke & Barker, 1996; Bing & Dahlin, 2003; Dahlin & Bing, 2004; Dahlin & Bing, 2006; Collins & White, 2007). С 2009 года количество соавторов таких публикаций не менее четырех (Clément et al., 2009; Martorana et al., 2009, 2017; Szalai et al., 2013), а начиная с 2012 года в исследованиях участвуют целые коллективы специалистов от пяти-семи (Wilkinson et al., 2012; Szalai et al., 2013, 2014, 2015; Loke et al., 2015; Uhlemann et al., 2018; Yan et al., 2023) до девяти человек (Torrese et al., 2014). Конечно, сравнение традиционных установок было доступно и группам соавторов из двух-трех человек (Vargas et al., 2014; Robbins & Plattner, 2017), и отдельным специалистам (Loke, 2018; Dosoky, 2023; Eissa, 2024). Рассматриваемой темой на протяжении нескольких лет (совместно, по отдельности и в составе коллективов) занимались М.Н. Loke (1996, 2012, 2015, 2018), Т. Dahlin (2004, 2006), R. Martorana

(2009, 2017), P.B. Wilkinson и J.E. Chambers (2012, 2015, 2018), S. Szalai (2013, 2014, 2015), S.S. Uhlemann (2015, 2018).

Среди особенностей методики проведения многоэлектродных зондирований традиционными и предлагаемыми в публикациях новыми установками неизменно отмечается зависимость проявления особенностей геоэлектрического разреза от плотности данных (например, Xu & Noel, 1993; Wilkinson et al., 2012). Большинство опубликованных примеров последовательностей электротомографических измерений предусматривают уменьшение плотности данных с увеличением глубины исследования (например, Dahlin & Bing, 2004; Martorana et al., 2009; Szalai et al., 2013; Loke et al., 2015). При сравнении традиционных установок, авторами публикаций, как правило, отмечается оптимальное сочетание удовлетворительной разрешающей способности и глубинности для трехэлектродной установки (Bing and Dahlin, 2003; Dahlin and Bing, 2006; Martorana et al., 2017 и др.). Значительная часть публикаций затрагивает вопрос оптимизации измерений, правильного выбора положений электродов для получения меньшего количества данных без существенной потери информативности получаемых моделей (Torrese et al., 2014; Loke et al., 2015; Wilkinson et al., 2015; Uhlemann et al., 2018).

Основная цель представляемых в настоящем сообщении результатов опытно-методических работ – получение такой оптимальной последовательности измерений с предпочитаемой авторами классической трехэлектродной установкой, которая могла бы заменить универсальную последовательность, наиболее часто используемую нашей группой в двухсегментной (2СМ) и многосегментной (МСМ) методиках электротомографии для изучения приповерхностных особенностей геологических сред со сложным строением (Модин и др., 2017; Большаков и др., 2017, 2019). В тоже время, дополнительно, интересно сравнить качественно и количественно модели именно для экспериментальных (не синтетических) данных других традиционных установок, полученных по предлагаемой методике отдельных измерений методом электротомографии. Таким образом, в представляемом сообщении приведены результаты анализа моделей, полученных по данным полевых опытно-методических работ с четырьмя традиционными установками (S, W, D, T) на двух разных участках.

### **Участки полевого опробования установок и аппаратура для измерений**

Методика отдельных измерений опробована на двух участках, расположенных в Калужской (**ALEX23 ПР UGRA**) и Волгоградской (**VLGR23 ПР 1**) областях. На каждом из участков измерения выполнены вдоль одного профиля. Отличия заключаются в длинах профилей (**ALEX23 ПР UGRA**

– 1075 м, 9 сегментов, 216 электродов, шаг между электродами –  $dx=5$  м; **VLGR23 ПР 1** – 382 м, 8 сегментов, 192 электрода,  $dx=2$  м) и в модификациях ([www.logsys.ru](http://www.logsys.ru)) использованной электроразведочной станции «Омега-48» (**ПР UGRA** – «Омега-48М2»; **ПР 1** – «Омега-48М»).

### **Последовательности измерений методом электротомографии**

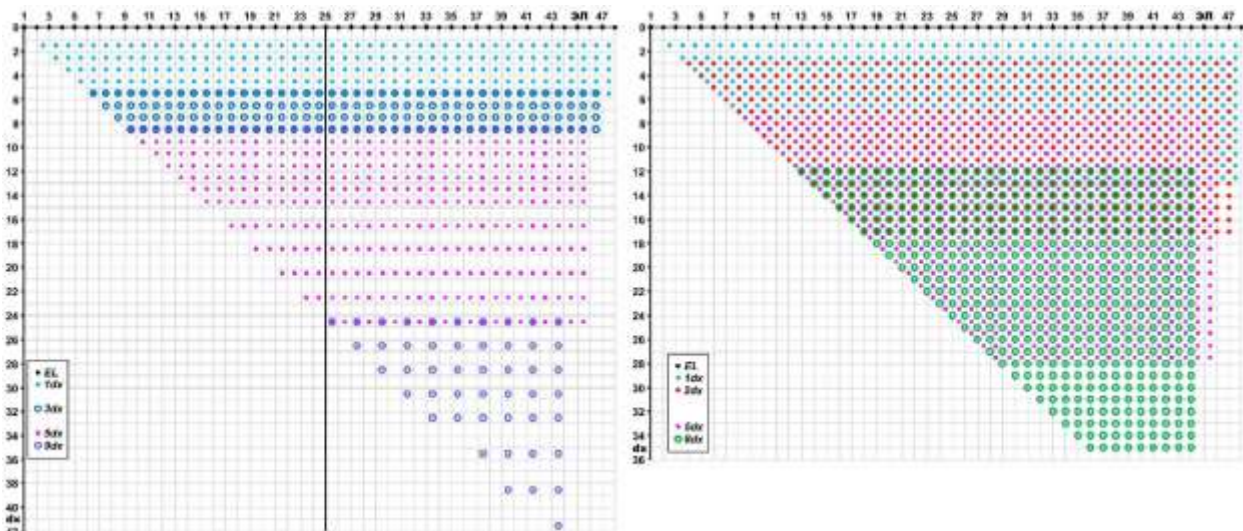
Измерения методом электротомографии выполнены по основному протоколу многосегментной методики со встречными трехэлектродными установками (Большаков и др., 2019) и по нескольким протоколам для основных классических электроразведочных установок (S, W, D, T) в рамках представляемой методики отдельных измерений.

### **Основная последовательность измерений**

Основная последовательность измерений встречными трехэлектродными установками оформлена в виде одного файла-протокола «T\_MCM\_1359dx», содержит 1578 строк-команд для выполнения электрических зондирований на двухсегментной расстановке 48 электродов и применяется авторами с 2015 года. Последовательное получение данных по этому протоколу происходит с использованием четырех измерительных линий с длинами равными одному, трем, пяти и девяти расстояниям между электродами ( $dx$ ). В рамках последовательности измерений по многосегментной методике (MCM), направленной на достижение максимально возможной глубинности исследований (Большаков и др., 2019), предусмотрено разрежение данных с глубиной за счет увеличения шага по пикетам и шага по разносам. Для каждой из двух встречных трехэлектродных установок выполняется 789 измерений с использованием четырех приемных линий и 26 действующих разносов. Для трехэлектродной установки  $A_{mp}$  на **Рисунке 1** (слева) в координатах «номер электрода – число шагов ( $dx$ )» схематично представлено условное распределение измерений (разрез точек записи) под двухсегментной расстановкой 48 электродов с шагом  $dx$ . Четырьмя разными цветами обозначены измерения, относящиеся к четырем приемным линиям с длинами равными одному ( $1dx$ ), трем ( $3dx$ ), пяти ( $5dx$ ) и девяти ( $9dx$ ) расстояниям между электродами. Практический опыт применения этой последовательности измерений показывает наличие в полевых данных эффектов, связанных с методическими особенностями. Присутствие методических эффектов является результатом вынужденной необходимости и продиктовано особенностями проведения зондирований на постоянном токе. Как правило, двумерная инверсия «справляется» с такими данными, однако, наложение на эти проявления эффектов от резких изменений строения исследуемой среды (границ слоев, неоднородностей) вызывает их усиление по амплитуде и увеличение областей искажений на разрезах кажущегося сопротивления. В условиях

интенсивных помех различной природы фиксируются дополнительные значительные искажения значений, вызванные суперпозицией перечисленных факторов.

Сокращение количества приемных линий и соответствующий выбор разносов для их смены позволяет реализовать смещение (сдвиг) методических эффектов (смена приемных линий, шага по пикетам, шага по разносам) с интервалов разносов, на которых проявляются особенности геологического строения и исключить их наложение. С этой целью опробована методика отдельных измерений, которая позволяет после отдельного получения данных для каждой приемной линии (разные протоколы), на этапе обработки, так компоновать результаты измерений чтобы исключить наложение методических эффектов на проявления особенностей строения исследуемой среды или значительно ослабить их совместное проявление.



**Рисунок 1.** Разрезы точек записи стандартных (слева) и отдельных (справа) измерений

### Последовательности для отдельных измерений

Авторами выбраны четыре приемные линии с длинами равными одному (1dx), двум (2dx), пяти (5dx) и восьми (8dx) расстояниям между электродами. В четырех отдельных файлах-протоколах («Т\_mn1dx», «Т\_mn2dx», «Т\_mn5dx», «Т\_mn8dx») с одной измерительной линией постоянной длины реализованы четыре последовательности измерений встречными трехэлектродными установками с разносами, увеличивающимися последовательно на величину шага между электродами до тех пор, пока значение геометрического коэффициента установки не превышает 5000 м. Общее число измерений во всех четырех протоколах составляет 4242 значения. Разрезы точек записи для трехэлектродной установки  $A_{mn}$  с четырьмя измерительными линиями постоянной длины представлены совместно, в координатах «номер электрода – число шагов (dx)» на **Рисунке 1** (справа). Условные положения точек измерений обозначены четырьмя разными цветами для



четырёх приемных линий. Замена одного основного протокола многосегментной методики с четырьмя приемными линиями на четыре отдельных последовательности измерений с приемными линиями постоянной длины приводит к увеличению общего числа измерений более чем в 2.5 раза (2.69). Действительно, визуальный анализ совместного представления разрезов точек записи (*Рисунок 1*, справа). позволяет выявить значительные (> 50%) перекрытия по разносам для приемных линий длиной  $1dx$  и  $2dx$ , а также для линий с длинами  $5dx$  и  $8dx$ . Для приемных линий с длинами  $2dx$  и  $8dx$  перекрытие протоколов по разносам < 50%. Наименьшее перекрытие протоколов – для измерительных линий  $1dx$  и  $8dx$ . Однако, легко заметить, что для «нечетных» приемных линий (длины кратны нечетному числу  $dx$ ), формально, точки записи расположены между электродами, а для «четных» линий (длины кратны четному числу  $dx$ ) – под электродами. Следовательно, в областях перекрытия протоколов «четных» и «нечетных» приемных линий, шаг по пикетам (между точками зондирования) составляет половину расстояния между электродами ( $0.5dx$ ). Фактически, при замене одного основного протокола многосегментной методики с четырьмя «НЕЧЕТНЫМИ» приемными линиями на четыре протокола с «ЧЕТНЫМИ» и «НЕЧЕТНЫМИ» приемными линиями, шаг между точками зондирования уменьшается в два раза, число самих зондирований удваивается, а увеличение общего числа измерений более чем в 2.5 раза соответствует полученному результату и воспринимается вполне адекватно. Таким образом, отдельные измерения дают возможность уменьшить влияние методических эффектов, получать полевые данные с шагом в два раза меньшим чем расстояние между электродами, сохранить глубинность исследований, отложить выбор мест смены приемных линий на этап обработки, комбинировать данные несколькими способами. Аналогичным образом подготовлены последовательности отдельных измерений для установок Шлюмберже ( $S_1dx, S_2dx, S_3dx$ ), дипольной ( $D_1dx, D_2dx, D_3dx, D_4dx, D_5dx, D_8dx$ ) и одна последовательность для установки Веннера ( $W_1-15dx$ ).

### **Полевые данные и их совокупности**

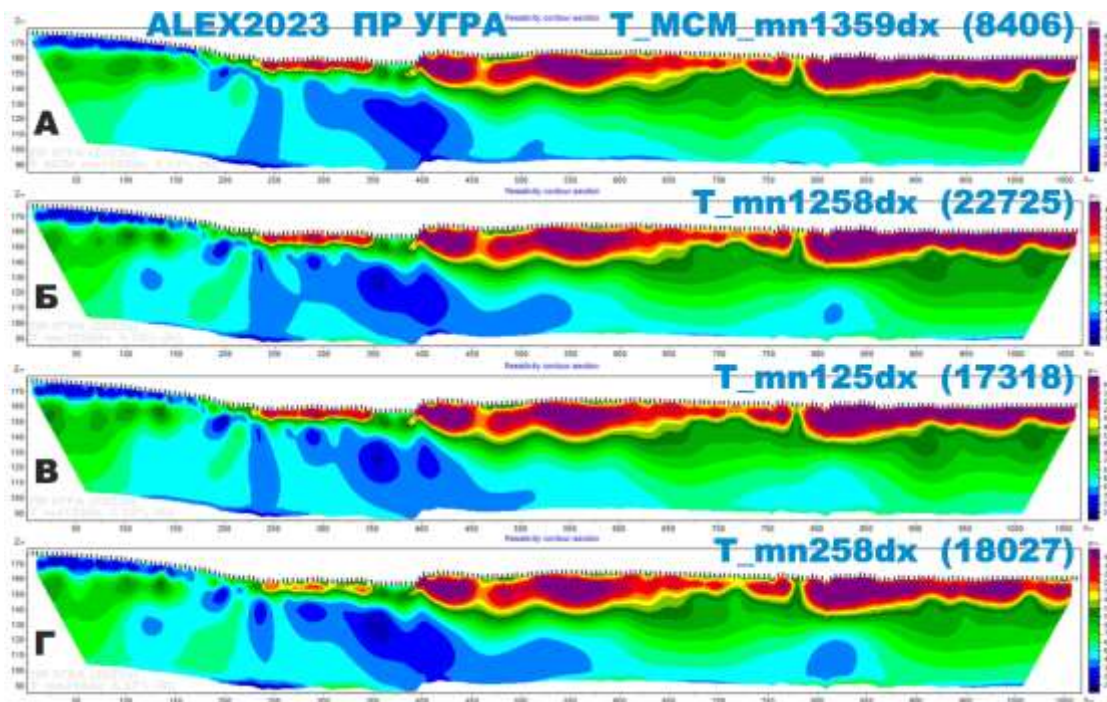
На каждом из участков измерения выполнены по следующим 15 протоколам: стандартному протоколу  $T\_MCM\_1359dx$  для трехэлектродной установки, по четырем протоколам отдельных измерений для трехэлектродной установки ( $T\_mn1dx, T\_mn2dx, T\_mn5dx, T\_mn8dx$ ), трем протоколам для установки Шлюмберже ( $S_1dx, S_2dx, S_3dx$ ), шести – для дипольной ( $D_1dx, D_2dx, D_3dx, D_4dx, D_5dx, D_8dx$ ) и одному для установки Веннера ( $W_1-15dx$ ). После обработки и редакции (программа «x2ipi», автор А.А. Бобачев, <https://x2ipi.ru/>) результаты полевых измерений представлены в виде разрезов кажущего сопротивления, примеры которых не приведены из-за ограничения объема этого сообщения. Полученные таким образом полевые данные традиционных

установок были использованы для отдельного проведения двумерной инверсии. Дополнительно из полевых данных отдельных измерений были получены комбинации для каждой из использованных традиционных установок, состоящие из нескольких (четырёх, трёх и двух) разрезов кажущегося сопротивления. Эти совокупности данных также использованы для проведения двумерной инверсии.

### Выбор модели и двумерная инверсия данных

Двумерная инверсия всех полевых данных (и их совокупностей) каждого участка работ выполнена по программе ZondRes2D (автор А. Каминский, [www.zond-geo.com](http://www.zond-geo.com)) для единой модели с целью получения возможности не только качественного, но и количественного сравнения моделей для разных установок. Результаты инверсии данных получены по классическому методу наименьших квадратов с регуляризацией (алгоритм «Marquardt»). По результатам анализа моделей и изменений невязок между теоретическими и экспериментальными значениями кажущегося сопротивления для десяти итераций инверсии каждого из наборов данных для дальнейшего качественного и количественного сравнения выбраны модели, полученные после шестой итерации.

### Результаты качественного визуального анализа моделей



**Рисунок 2.** Результаты инверсии данных трехэлектродных установок (ПР UGRA), полученных по стандартному протоколу  $T\_MCM\_mn1359dx$  (А) и по совокупностям данных отдельных измерений с четырьмя (Б) и тремя (В, Г) приемными линиями постоянной длины.

Для каждого из участков опытно-методических работ выполнено качественное визуальное сравнение моделей, полученных для каждой установки и между ними. В качестве примера, на **Рисунке 2** совместно представлены результаты двумерной инверсии данных трехэлектродной установки для **ПР UGRA** по данным стандартных (А) измерений (протокол T\_MCM\_mn1359dx, 8406 отсчетов после редакции) и по данным совокупности четырех (Б) протоколов (22695 отсчетов после редакции) для приемных линий постоянной длины (T\_mn1dx, T\_mn2dx, T\_mn5dx и T\_mn8dx), и трех (В, Г) протоколов приемных линий (T\_mn1dx, T\_mn2dx, T\_mn5dx и T\_mn2dx, T\_mn5dx, T\_mn8dx, соответственно). Модели на **Рисунке 2** представлены в виде разрезов удельного электрического сопротивления и в целом похожи, за исключением лишь некоторых незначительных отличий.

### **Количественная оценка сходства моделей**

Для количественной оценки близости моделей, полученных на каждом участке, выполнены расчеты параметра сходства между моделью для данных стандартных измерений и другими моделями. При совпадении удельных сопротивлений в ячейках сравниваемых моделей значение параметра сходства равно 100%. Если сопротивление для модели сравнения меньше, чем для модели по стандартным измерениям, то величина сходства меньше 100%, и наоборот, – для большего значения сопротивления модели сравнения параметр сходства больше 100% на величину разности логарифмов, выраженную в процентах от значения сопротивления модели по стандартным данным.

### **Анализ параметра сходства моделей**

Для каждого из участков выполнены расчёты сходства значений удельных сопротивлений, полученных моделей. Количественный анализ рассчитанных значений сходства выполнен для всех моделей сравнения с оценкой наиболее вероятных значений сходства, оценкой медианного значения и оценкой величины стандартного отклонения. Результаты количественного анализа значений сходства приведены в таблицах для каждой установки отдельно, но не представлены в данном сообщении из-за ограничений по объему. Модели в таблицах отсортированы по возрастанию значений стандартного отклонения. Для большинства моделей медианные значения сходства отличаются на 2-5 %, что означает весьма незначительные различия в значениях удельных сопротивлений сравниваемых моделей. Этот вывод подтверждают и низкие значения стандартного отклонения, особенно для T установки. Необходимо отметить, что значения сходства рассчитаны по всем соответствующим ячейкам моделей в том числе и для ячеек со значительными отклонениями

характерными для нижней и боковых границ. Таким образом, результаты расчетов оценок стандартного отклонения получены «с избытком», т.е. завышены из-за использования при расчётах схождения значений сопротивлений в ячейках близких к краям моделей. Несмотря на это, значения стандартного отклонения величины схождения моделей, полученных по данным совокупностей отдельных измерений с Т установкой не превышают значений 5% для первых пяти моделей. Для установок S, W и D аналогичные значения значительно выше и достигают максимальных для D установки на участке **VLGR23 ПР 1**. Отметим, что корреляция между увеличением указанных значений и количеством измерений в полевых данных (нижняя строка таблиц) не выявлена.

### **Результаты инверсии прореженных данных**

Основной особенностью использованных для проведения двумерной инверсии данных отдельных измерений и их совокупностей является значительное превышение числа измерений по сравнению с числом измерений по стандартному протоколу для Т установки. Избыточное количество отдельных измерений позволяет их проредить с целью выявления оптимального числа значений, позволяющих получать удовлетворительные и достоверные результаты. Для данных установки Т такое прореживание данных выполнено по совокупности данных Т<sub>mn28dx</sub> по двум участкам опробования. Результаты аналогичны по обоим участкам – оценки параметра схождения для моделей с меньшим числом измерений удовлетворительные и не превышают оценок для модели по исходным данным. Напротив, и оценка значения медианы схождения, и оценка стандартного отклонения схождения показывают, пусть и формально, но большую «близость» моделей по прореженным данным Т установки к модели по данным стандартного протокола измерений.

### **Заключение**

Для традиционных электроразведочных установок опробована методика отдельных измерений методом электротомографии с приемными линиями постоянной длины. Получены представительные данные для двух участков опытно-методических работ. По полевым данным отдельных измерений традиционными установками возможно получение наборов данных свободных от методических эффектов. Проведенный совместный качественный анализ результатов инверсии данных отдельных измерений традиционными установками и результатов инверсии совокупностей этих данных для каждого из участков работ показал, что большинство геоэлектрических моделей в целом совпадают и отличаются лишь деталями. Выводы об эквивалентности полученных моделей, сделанные в результате качественного анализа, подтверждаются по результатам количественного анализа оценок распределений предложенного

авторами параметра сходства. Изменение значений удельного сопротивления для большинства сравниваемых моделей не превышает 5%. Наиболее близкими к модели по данным стандартных измерений являются модели, полученные по совокупностям отдельных измерений трехэлектродной установкой с четырьмя (Т\_1258dx) и тремя (Т\_125dx) приемными линиями. Среди предложенных и опробованных вариантов методики отдельных измерений предпочтительными являются варианты с наименьшим числом измерений.

## Литература

1. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2017] Использование выносных линий для увеличения глубины исследования при проведении электротомографии. Инженерные изыскания, 2017, №1, с.46-53.
2. Большаков Д.К., Модин И.Н., Ефремов К.Д. [2019] 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.)
3. Модин И.Н., Большаков Д.К., Ефремов К.Д. [2017] Развитие технологии электротомографии с использованием многосегментных измерений. Тезисы докладов на конференции «Инженерная геофизика – 2017», г. Кисловодск, Россия, 24-28 апреля 2017. (E07, 10 стр.)
4. Bing Z., Dahlin T. [2003] Properties and effect of measurements errors on 2D resistivity imaging surveying. Near Surface Geophysics, 2003, 1(3), 105-117.
5. Dahlin T., Bing Z. [2004]. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. Geophysical Prospecting, 2004, 52 (5), 379–398 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
6. Dahlin, T., Bing Z. [2006] Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. NearSurface Geophysics, 2006, 4 (2), 113-123. <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2005037>
7. Collins S., White R.M.S. [2007] Six years experience with Offset pole-dipole and other 3D IP arrays. What have we learnt? ASEG Extended Abstracts 2007:1, 1-4, DOI: 10.1071/ASEG2007ab023
8. Clément R., Descloîtres M., Gunther T., Oxarango L. [2009] Comparison of three arrays in time-lapse ERT: Simulation of a leachate injection experiment. ArchéoSciences, 2009, 33, 275–278. doi:10.4000/archeosciences.1692. (<http://archeosciences.revues.org/1692>)
9. Dosoky W. [2023] Assessment of three mixed arrays dataset for subsurface cavities detection using resistivity tomography as inferred from numerical modelling. Research Square 2023, 19 p. (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3229144/v1>)

10. Eissa R. [2024] The Practicality of Resistivity Method for Recognizing Vertically Distributed Anomalies Using Simulated Models. *Iraqi Geological Journal*, 2024, 57 (1B), 204–213.
11. Loke M.H., Barker R.D. [1996] Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, *Geophysical Prospecting*, 1996, 44, 499-523.
12. Loke M.H., Wilkinson P.B., Chambers J.E., Uhlemann S.S., Sorensen J.P.R. [2015] Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 112(1), 136–146, doi:10.1016/j.jappgeo.2014.11.011
13. 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](http://www.geotomosoft.com)
14. Martorana R., Fiandaca G., Casas Ponsati, A., Cosentino, P.L. [2009] Comparative tests on different multi-electrode arrays using models in near-surface geophysics. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, 6 (1), 1-20 <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/001>
15. Martorana R., Capizzi P., D'Alessandro A., Luzio D. [2017] Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 137, 34–48, doi:10.1016/j.jappgeo.2016.12.012 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.012>)
16. Robbins A., Plattner A. [2017] 2.75-D ERT: ZIGZAG ELECTRODE ACQUISITION STRATEGY TO IMPROVE 2-D PROFILES. SAGEEP 2017, Denver, Colorado USA, 183-187. (<http://www.eegs.org>)
17. Szalai S., Szarka L. [2008] On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 2008, 56, 159–175. doi:10.1111/j.1365-2478.2007.00673.x
18. Szalai S., Koppán A., Szokoli K., Szarka L. [2013] Geoelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. *Near Surface Geophysics*, 2013 11 (1), 51-62 <http://dx.doi.org/10.3997/1873-0604.2012058>
19. Szalai S., Lemperger I., Metwaly M., Kis A., Wesztergom V., Szokoli K., Novak A. [2014] Multiplication of the depth of detectability using  $\gamma$ 11n arrays, *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 107, 195–206. doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.06.003
20. Szalai S., Lemperger I., Metwaly M., Kis A., Wesztergom V., Szokoli K., Novak A. [2015] Increasing the effectiveness of electrical resistivity tomography using  $\gamma$ 11n configurations. *Geophysical Prospecting*, 2015, 63, 508–524. doi: 10.1111/1365-2478.12215
21. Torrese P., Rainone M.L., Signanini P., Greco P., Colantonio F., Porel G., Nauleau B., Paquet D., Mari J.-L. [2014] 3D ERT imaging of the fractured-karst aquifer underlying the experimental site of poitiers (France): comparing wenner-schlumberger, pole-dipole and hybrid arrays. SAGEEP 2014, Boston, Massachusetts USA, 507-515.

22. Uhlemann S., Wilkinson P.B., Maurer H., Wagner F.M., Johnson T.C., Chambers J.E. [2018] Optimized survey design for Electrical Resistivity Tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement. *Geophysical Journal International*, Volume 214, Issue 1, July 2018, Pages 108–121, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy128>
23. Vargas D., Cifuentes G., Chavez R.E. [2014] Non-Conventional 3D electric resistivity tomography arrays. 20th European Meeting of EEG, Athens, Greece, 14-18 September 2014, Conference Paper. · DOI: 10.3997/2214-4609.20141986
24. Wilkinson, P.B., Loke, M.H., Meldrum, P.I., Chambers, J.E., Kuras, O., Gunn, D.A., Ogilvy, R.D. [2012] Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International*, 2012, 189 (1), 428-440 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05372.x>
25. Xu B., Noel M. [1993] On the completeness of data sets with multi-electrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, 1993, 41 (6), 791–801 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.1993.tb00885.x>
26. Yan J., Zeng Z., Zhao X., An B., Bai L., Zhao J., Li J. [2023] A New Electrical Resistivity Tomography Scheme of Borehole-to-Surface-to-Cliff Detection and Imaging for Grotto Rock Structure. *Remote Sensing* 2023, 15, 311. (<https://doi.org/10.3390/rs15020311>)