

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  
2025

## Содержание:

1. Связь между солнечной активностью и качеством магнитотеллурических данных	
В.А. Куликов, Д.В. Епишкин, А.П. Ионичева, Н.М. Шагарова . . . . .	2
2. Подавление эффектов приповерхностных неоднородностей в магнитотеллурических данных	
М.А. Суконкин, П.Ю. Пушкарев . . . . .	7
3. Использование донной электротомографии для расширения возможностей электроразведки при исследовании транзитной зоны акваторий	
А.А. Бобачев . . . . .	12
4. Результаты работ с градиентометром MariMag300m за 2023 и 2024 годы	
И.В. Лыгин, А.В. Морозов, К.М. Кузнецов . . . . .	16
5. Локализация аномалий масконов Луны при помощи сверточных нейронных сетей	
К.М. Кузнецов, А.Д. Шклярчук, И.В. Лыгин . . . . .	20
6. Оценка глубин залегания фундамента в пределах зоны сочленения Енисей-Хатангского прогиба и Сибирской платформы по аномалиям потенциальных полей с использованием различных алгоритмов машинного обучения	
Н.А. Гарамов, Л.А. Золотая . . . . .	25
7. Многомерный анализ петрофизических связей радиометрии с битумоидами в карбонатах	
Б.А. Никулин, Н.А. Скибицкая, М.Н. Большаков, А.А. Никитин . . . . .	30

## СВЯЗЬ МЕЖДУ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И КАЧЕСТВОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В.А. Куликов<sup>1,2</sup>, Д.В. Епишкин<sup>2,3</sup>, А.П. Ионичева<sup>3</sup>, Н.М. Шагарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *ООО "Северо-Запад", г. Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, г. Троицк, Москва, Россия*

Одним из ведущих и востребованных методов электроразведки является магнитотеллурическое (МТ) зондирование (МТЗ), основанное на использовании естественного переменного электромагнитного (ЭМ) поля Земли. Источники низкочастотного (< 1 Гц) МТ поля находятся в ионосфере, и связаны с потоком заряженных частиц, исходящих от Солнца. При достижении магнитосферы Земли этот поток разделяется на две части - положительно и отрицательно заряженных частиц, закручивающихся вдоль силовых линий Земного магнитного поля [1].

Высокочастотная (> 1 Гц) часть МТ поля Земли связана с грозовой активностью и источниками техногенного происхождения (поля дальних и ближних радиостанций, теле- и радиосвязи, линий ЛЭП и т.д.).

Качество данных, получаемых в магнитотеллурических методах, зависит от интенсивности и спектральной плотности естественного ЭМ поля Земли. В частности, значительное влияние на результат МТЗ оказывают спектральные минимумы естественного поля, которые есть и в низкочастотной и в высокочастотной части спектра.

Установление связи между спектральной плотностью электрических и магнитных компонент МТ поля и солнечной активностью, а также изучение суточного режима колебаний амплитуды электрического и магнитного полей, могут помочь в выборе режима и длительности регистрации для достижения максимального качества с минимальными временными затратами.

Для решения поставленной задачи использовались полевые МТ данные, полученные в период с января 2020г по февраль 2025г на участке 300×300км, в юго-западной части Московской синеклизы. Общий объём данных – 250 ф.н. методом МТЗ был получен в результате 8 экспедиций, проводившихся как в летний, так и в зимний период [2].

Регистрация компонент МТ поля осуществлялась с помощью электроразведочных станций МЭРИ-ПРО и NORD, разработанных в компании ООО «Северо-Запад», с использованием индукционных датчиков IMS-010 и IMS-015 производства ООО «Вега».

Для обработки временных рядов МТ поля и получения спектров отдельных компонент использовались две программы - EPI-KIT и Aero MT Viewer, разработанные в компании ООО «Северо-Запад» (автор - Епишкин Д.В) [3]. Для оценки качества результатов обработки

магнитотеллурических данных использовалась программа «QC-QA» разработанная в ООО «Северо-Запад».

### **Параметры солнечной и геомагнитной активности**

Солнечную активность оценивают по амплитуде теплового рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0.5—10 кэВ. По этой классификации [4] солнечная вспышка обозначается одной из латинских букв А, В, С, М, Х и индекса за ней. Интенсивность излучения между буквами различается на порядок ( $A1 = 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $X1 = 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>), а индекс указывает, во сколько раз сильнее вспышка, чем нулевой уровень [5].

Для оценки геомагнитной активности используют индексы К, Кр и Ар.

Индекс К представляет собой отклонение магнитного поля Земли от нормы в течение трёхчасового интервала. Кр-индекс определяется как средневзвешенное значение, полученное в 13 магнитных обсерваториях, расположенных в субавроральной зоне.

Ар индекс вычисляется по значениям Кр индекса и представляет изменение наиболее возмущенного элемента магнитного поля D или H в трехчасовом интервале времени на среднеширотных станциях. [6].

### **Этапы анализа данных**

По результатам обработки записей магнитотеллурического поля нами была сформирована база данных спектральной плотности компонент электрического и магнитного полей по всем точкам регистрации для каждого часа записи в частотном диапазоне от 0.001 до 1000 Гц. Для упрощения анализа и повышения наглядности результатов, весь частотный диапазон был разбит на шесть поддиапазонов, в границах которых было выполнено осреднение значений. Эти поддиапазоны мы обозначили следующим образом: ВЧ1 ( $10^3$  Гц –  $10^2$  Гц); ВЧ2 ( $10^2$  Гц –  $10^1$  Гц); СЧ1 ( $10^1$  Гц –  $10^0$  Гц); СЧ2 ( $10^0$  Гц –  $10^{-1}$  Гц); НЧ1 ( $10^{-1}$  Гц –  $10^{-2}$  Гц); НЧ2 ( $10^{-2}$  Гц –  $10^{-3}$  Гц).

### **Первый этап. Сопоставление с солнечной активностью.**

На первом этапе работы, на основе коэффициента корреляции Пирсона, и в графическом виде, было выполнено сопоставление между амплитудой спектров МТ поля в разных частотных поддиапазонах и параметрами солнечной активности.

В таблице № 1 приведены данные по 8 экспедициям и средние значения солнечной и геомагнитной активности для периода, охватывающего каждый выезд. Экспедиции № 1,3,8 проводилась в зимний период, остальные - в летний сезон (июнь – август).

Как видно из таблицы № 1, за период измерений с января 2020 г. по февраль 2025 г. солнечная активность существенно выросла, что выражается и в количестве солнечных вспышек разного класса, в интенсивности рентгеновского потока, в средних значениях планетарной

геомагнитной активности. Качество результатов обработки данных МТЗ также растет с 2020 г. от средней оценки 3.5 до 4 - 4.4.

Таблица 1. Даты экспедиций, средние значения индексов солнечной активности и качества результатов обработки данных МТЗ по оценкам программы QC-QA.

Выезды	Кол-во ф.н.	Даты	Kp	Ap	РП	C+M+X	QC-QA
1	24	26.01.2020 - 01.02.2020	2.6	5.2	1.03E-08	0	3.5
2	16	11.08.2020 - 15.08.2020	1.4	3.8	1.69E-08	0	3.7
3	31	26.01.2022 - 02.02.2022	3.5	10	5.15E-07	12	3.8
4	43	08.07.2022 - 19.07.2022	3	9	1.04E-06	14	4.1
5	53	08.07.2023 - 21.07.2023	3.1	9.2	1.70E-06	28	4.3
6	25	20.06.2024 - 27.06.2024	2.6	9.3	2.39E-06	22	4.4
7	35	15.07.2024 - 23.07.2024	2.3	5.4	2.19E-06	51	4.4
8	22	27.01.2025 - 03.02.2025	2.9	10	1.93E-06	38	4

В таблице № 2 представлены коэффициенты корреляции между осредненными амплитудами магнитного поля для каждого из шести частотных диапазонов с одной стороны и параметрами солнечной и геомагнитной активности с другой.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между плотностью спектров МТ полей, параметрами солнечной активности и качеством результатов обработки данных по оценкам программы QC-QA. Расчет по средним значениям за каждую экспедицию.

ЧД	Kp	Ap	РП	Вспышки	QC-QA
ВЧ_1	-0.3	-0.4	-0.1	-0.2	<b>0.3</b>
ВЧ_2	-0.3	-0.2	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.7</b>
СЧ_1	-0.2	-0.1	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>
СЧ_2	0.2	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>
НЧ_1	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>
НЧ_2	<b>0.8</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>

Приведенные расчеты показывают, что

а) Плотность спектра электрического и магнитного полей Земли имеет положительную корреляцию с общим количеством солнечных вспышек и интенсивностью рентгеновского потока. Максимум коэффициента корреляции приходится на диапазон частот от 0.01 до 100 Гц. На самых больших периодах, коэффициенты корреляции снижаются.

б) Плотность высокочастотного спектра ЭМ поля Земли до частоты 1 Гц не имеет корреляции с индексами геомагнитной активности Kp и Ap. На низких частотах более высокий уровень корреляции с индексами Kp и Ap фиксируется для магнитного поля. На частотах ниже 0.01 Гц он превышает значение 0.8 (рис. 1).

в) Качество данных МТЗ тесно связано с плотностью спектра как магнитного, так и электрического полей. Наибольшее влияние на результат обработки оказывает плотность спектра средних и высоких частот (0.1 – 100 Гц) магнитного поля, а также самая высокочастотная (100-1000 Гц) и низкочастотная (<0.1 Гц) части спектра электрического поля.

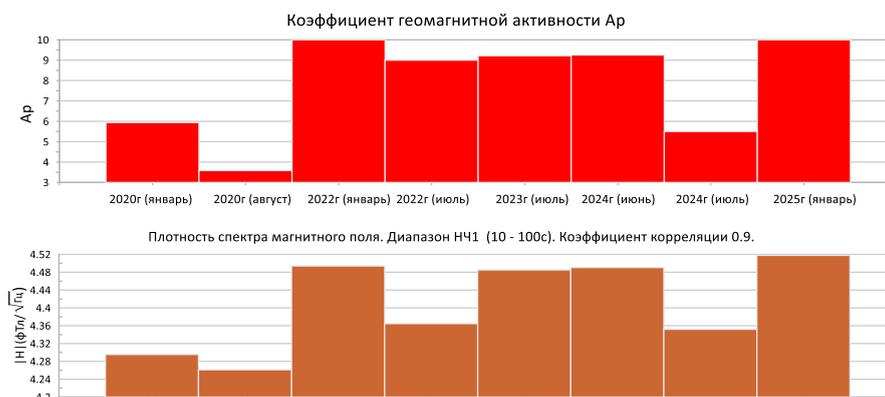


Рис. 1. Графическое сопоставление индекса  $A_p$  с плотностью спектра низких частот магнитного поля ( $<0.01\text{Гц}$ ).

### Второй этап. Анализ суточных колебаний плотности спектра.

На втором этапе работы нами был проведён анализ суточных колебаний амплитуды электрического и магнитного полей, его изменения, происходившие за пятилетний цикл измерений. Анализируя полученные результаты, мы можем отметить следующие закономерности:

1. Для все частот, более низкая интенсивность поля наблюдается в ночные и утренние часы, от 0 до 11-12 часов.

2. Минимумы и максимумы амплитуды магнитного поля по мере увеличения частоты колебаний, смещаются вправо по временной шкале. Несколько нарушают выявленную закономерность самые низкие частоты диапазона НЧ1 ( $< 0.01\text{ Гц}$ ), но мы связываем этот с тем фактом, что осреднение самых низких частот проводилось не по часовому, а по трехчасовому интервалу.

3. Графики часовых колебаний электрического и магнитного полей, полученные в зимний и летний период несколько различаются при сохранении общих закономерностей, описанных в п. 2.

4. Амплитуда поля на средних и высоких частотах в зимний период снижается. На низких частотах (10-1000с) уровень поля по результатам зимних измерений не уступает летним. Максимальные изменения суточных колебаний амплитуды в зимний и летний периоды характерны для диапазона СЧ2 (1-10с) и НЧ2 (100-1000с).

### Выводы

Индексы геомагнитной активности  $K_p$  и  $A_p$  имеют высокую корреляцию только с плотностью магнитной компоненты МТ поля на низких частотах. Все частоты выше 1 Гц с индексами геомагнитной активности не коррелируют. Ориентироваться на прогноз уровня  $K_p$  или  $A_p$  необходимо только в случае проведения глубинных зондирований, когда наибольшее внимание отводится низкочастотному диапазону поля. Максимум устойчивых и регулярных

короткопериодных пульсаций (КПК), которые в нашем случае относятся к диапазону НЧ1 приходится на утренние и дневные часы от 8 утра до 17 вечера, а более низкие частоты ( $> 100\text{с}$ ) характеризуются примерно одинаковой интенсивностью в течении суток, за исключением ранних утренних часов, когда им амплитуда минимальна (рис. 8).

Если целью работ является получение максимально высокого качества на средних частотах, от 0.01 до 100 Гц, то здесь лучше полагаться на прогноз интенсивности рентгеновского потока или солнечных вспышек. Максимальный уровень поля на этих частотах фиксируется в дневные и вечерние часы, с 12 до 23 ч.

Самые высокие частоты, регистрируемые в методе АМТЗ, 100-1000 Гц максимальны в ночные часы и не имеют положительной корреляции ни с параметрами солнечной активности, ни с индексами геомагнитной активности.

### Литература

1. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей, том I, издание 2 / Под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Полипресс Тверь, 2018. 276 с.
2. Куликов В.А., Варенцов Ив М., Иванов П.В., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Королькова А.В., Лозовский И.Н., Родина Т.А., Яковлев А.Г. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в районе Слободского геодинамического узла (Восточно-Европейская платформа) // Вестник Камчатской региональной ассоциации "Учебно-научный центр". Серия: Науки о Земле, издательство Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). 2023. Т. 60. № 4. С. 5-21.
3. Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных синхронных магнитотеллурических зондирований // Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2018. 132 с.
4. Priest, Eric Ronald. Flare classification // Solar flare magnetohydrodynamics. Gordon and Breach Science Publishers. 1981. P. 51.
5. Сотникова Р.Т. Единая база данных параметров рентгеновских вспышек и групп пятен разных классов (McIntosh) за три цикла солнечной активности 1977–2007 гг. // Солнечно-земная физика. 2013. С. 37–40.
6. [www.wdcb.ru](http://www.wdcb.ru)

# ПОДАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

М.А. Суконкин<sup>1</sup>, П.Ю. Пушкарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

## Введение

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) применяется при изучении глубоких горизонтов земной коры и верхней мантии, при поиске и разведке месторождений углеводородов, твёрдых полезных ископаемых, а также геотермальных ресурсов. Локальные приповерхностные неоднородности (ЛППН), присутствующие в верхней части разреза, могут существенно искажать МТ данные, которые характеризуют изучаемые объекты, залегающие более глубоко [1]. При использовании низких частот, когда глубина проникновения поля много больше размеров ЛППН, существует связанное с ними аномальное поле, пропорциональное нормальному, и обладающее той же фазой и частотной зависимостью. В таком случае, наблюдаемая разность потенциалов между измерительными электродами становится завышенной (или заниженной) и происходит сдвиг кривых кажущегося сопротивления, в то же время фазовые кривые остаются неискаженными [4].

## Геоэлектрическая модель

Для оценки влияния ЛППН удобно использовать синтетические данные, рассчитанные для известной геоэлектрической модели. Наша модель включает в себя глубинный фоновый слоистый разрез, глубинную трёхмерную неоднородность, а также приповерхностный слой. В первом варианте модели этот слой является однородным, а во втором – содержит множество трёхмерных ЛППН. Фоновый разрез состоит из трёх слоёв, имитирующих проводящий осадочный чехол, высокоомную литосферу, в которой расположен грабен, а также проводящую мантию (рис. 1). Помимо варианта модели с однородным верхним слоем, был создан вариант с ЛППН. Эти неоднородности были помещены в верхние две ячейки модели, высотой 10 и 15 м, то есть в слой мощность 25 метров. Значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) неоднородностей варьируется от 1 Ом·м до 100 Ом·м при фоновом УЭС верхнего слоя 10 Ом·м.

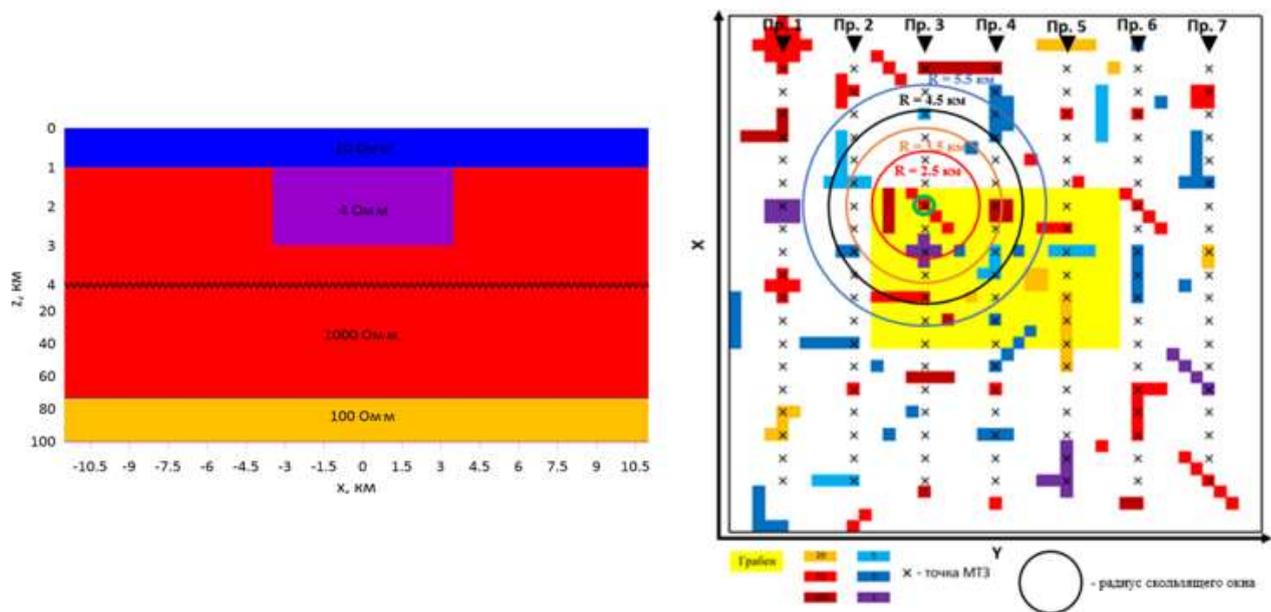


Рис. 1. Слева - разрез геоэлектрической модели, справа - карта верхнего слоя, содержащего ЛППН (размер 22.5 x 22.5 км). Фоновое УЭС 10 Ом·м, УЭС ЛППН меняются от 1 до 100 Ом·м. Жёлтый прямоугольник – положение глубинного грабена. Крестики – точки МТЗ. Кругами обозначены радиусы скользящих окон, в которых проводилось сглаживание.

### Влияние ЛППН на МТ-данные

Мы будем сравнивать МТ данные, полученные для моделей с однородным и с неоднородным верхним слоем. На рис. 2 представлены кривые эффективного кажущегося сопротивления и фазы эффективного импеданса, полученные в точке, обведённой кружками на карте на рис. 1. Как уже упоминалось, под влиянием аномального поля, связанного с ЛППН, происходит статическое смещение кривых кажущегося сопротивления, а фазовые кривые остаются неискаженными. Подробнее влияние ЛППН было рассмотрено в статье [2].

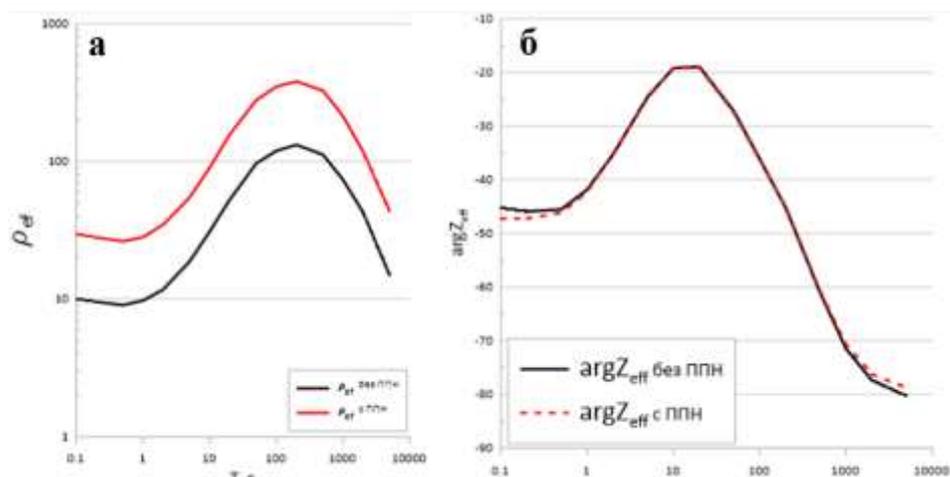


Рис 2. Кривые эффективного кажущегося сопротивления (а) и фазы эффективного импеданса (б).

### Анализ полярных диаграмм

Важным подходом к определению наличия искажения в точке МТЗ является анализ полярных диаграмм тензора импеданса и фазового тензора. В статье [3] мы построили и проанализировали диаграммы компонент МТ данных в разных точках. Амплитудные полярные диаграммы компонент как тензора импеданса  $[Z]$ , так и теллурического тензора  $[T]$ , сильно подвержены искажениям от ЛППН, в то время как фазовые диаграммы и диаграммы фазового тензора не подвержены этому влиянию. Таким образом, сравнивая ориентацию диаграмм модуля главной компоненты  $|Z_{xy}|$  и главной компоненты фазового тензора  $\Phi_{xx}$ , можно определить, подвержена ли влиянию ЛППН конкретная точка МТЗ (рис. 3).

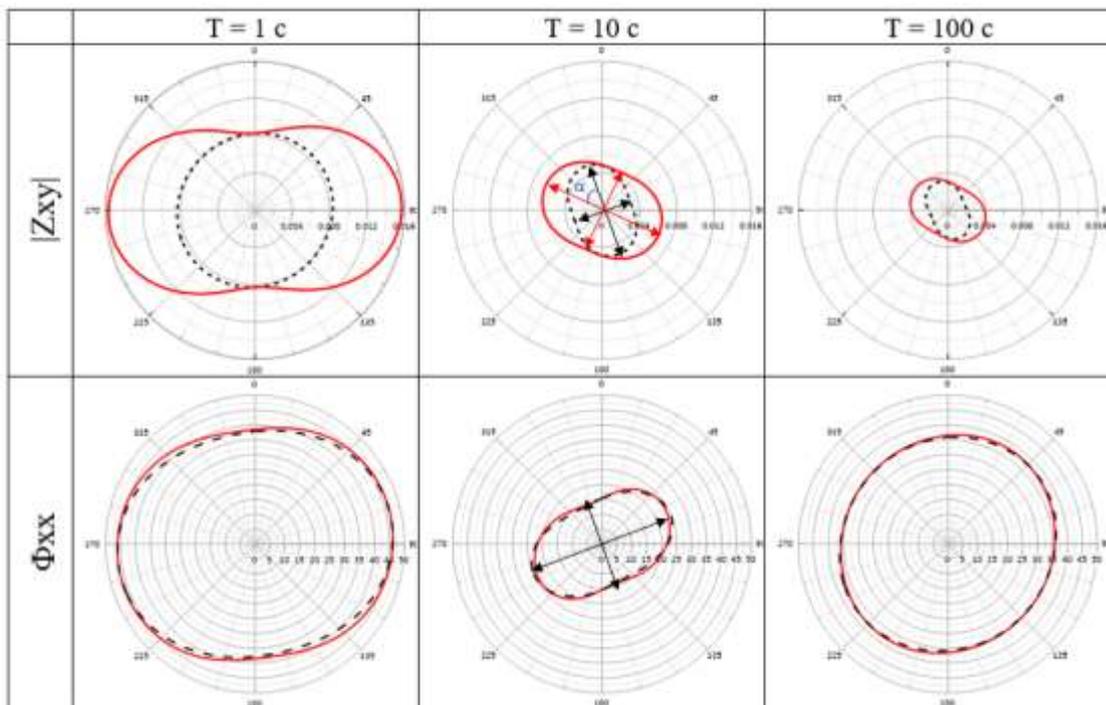


Рис. 3. Полярные диаграммы модуля главной компоненты тензора импеданса (вверху) и главной компоненты фазового тензора (внизу). Чёрным цветом показаны кривые для модели с однородным верхним слоем, красным – с ЛППН.

### Нормализация с использованием сглаживающего фильтра

В данной работе нами была выполнена площадная нормализация на периоде  $T_0 = 10$  с. Этот период был выбран после анализа карт, псевдоразрезов и кривых различных параметров МТ-поля на периодах 1, 10 и 100 с, выполненного в предыдущей нашей работе [2]. С помощью фильтров, о которых будет сказано ниже, были получены сглаженные значения компонент МТ-поля  $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$  в каждой точке наблюдения. Далее в тех же точках рассчитывался коэффициент

$k(T_0) = f^{\text{сглаж.}}(T_0) / f(T_0)$ , где  $f(T_0)$  – исходное значение в заданной точке. Затем вся кривая приводится к сглаженному уровню путем умножения на коэффициент  $k$ .

Пространственный сглаживающий фильтр, применяемый для расчета  $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$ , строится с помощью весовой функции  $W^R$  таким образом, что текущая точка МТЗ имеет при осреднении максимальный вес, а вес соседних точек тем меньше, чем больше расстояние до них  $R$ . Помимо веса, отражающего удаление точки от центра скользящего окна, можно ввести для каждой точки вес  $W^A$ , который будет тем меньше, чем сильнее значение  $f$  для данной точки отличается от среднегеометрического значения  $f^{\text{средн.}}$ , вычисленного в пределах круга, ограниченного радиусом фильтра  $R$ . Также нами был предложен вес  $W^D$ , который тем меньше, чем сильнее различаются ориентировки полярных диаграмм модуля главной компоненты тензора импеданса и главной компоненты фазового тензора.

Далее общий вес точки зондирования можно рассчитать по формуле:

$$W = W^R \cdot W^A \cdot W^D.$$

Для получения сглаженного значения  $f^{\text{сглаж.}}(T_0)$  в некоторой точке наблюдения выполняется осреднение по всем точкам в пределах круга, ограниченного радиусом фильтра:

$$f^{\text{сглаж.}}(T_0) = \prod_{i=1}^M \sqrt[L]{f(i)^{W_i}},$$

где  $M$  – число точек в пределах радиуса осреднения, степень корня  $L$  – сумма весов.

### Результаты нормализации

Нормализация кривых МТЗ, основанная на пространственной низкочастотной фильтрации, эффективно подавляет приповерхностные искажения в главных компонентах  $[Z]$  и  $[T]$ . Для дополнительных компонент  $[Z]$  и  $[T]$  нормализация малоэффективна. Результат нормализации кривых МТЗ улучшается при использовании дополнительных весов, «штрафующих» точки МТЗ за «ураганные вылеты» уровней кривых  $W^A$  и за расхождение осей амплитудных и фазовых полярных диаграмм  $W^D$  (рис. 4).

### Заключение

Результаты моделирования показывают, что локальные приповерхностные неоднородности приводят к статическим смещениям амплитудных кривых МТЗ, построенных по компонентам тензора импеданса  $[Z]$  и теллурического тензора  $[T]$ , в то время как фазы этих компонент и фазовые тензоры  $[\Phi(Z)]$  и  $[\Phi(T)]$  свободны от искажений. Нормализация кажущегося сопротивления позволяет подавлять эффекты от ППН. Использование дополнительных весовых характеристик – за отличие амплитуды в точке от средней в

скользящем окне и за отклонение амплитудной диаграммы от диаграммы фазового тензора позволяет улучшить результат нормализации.

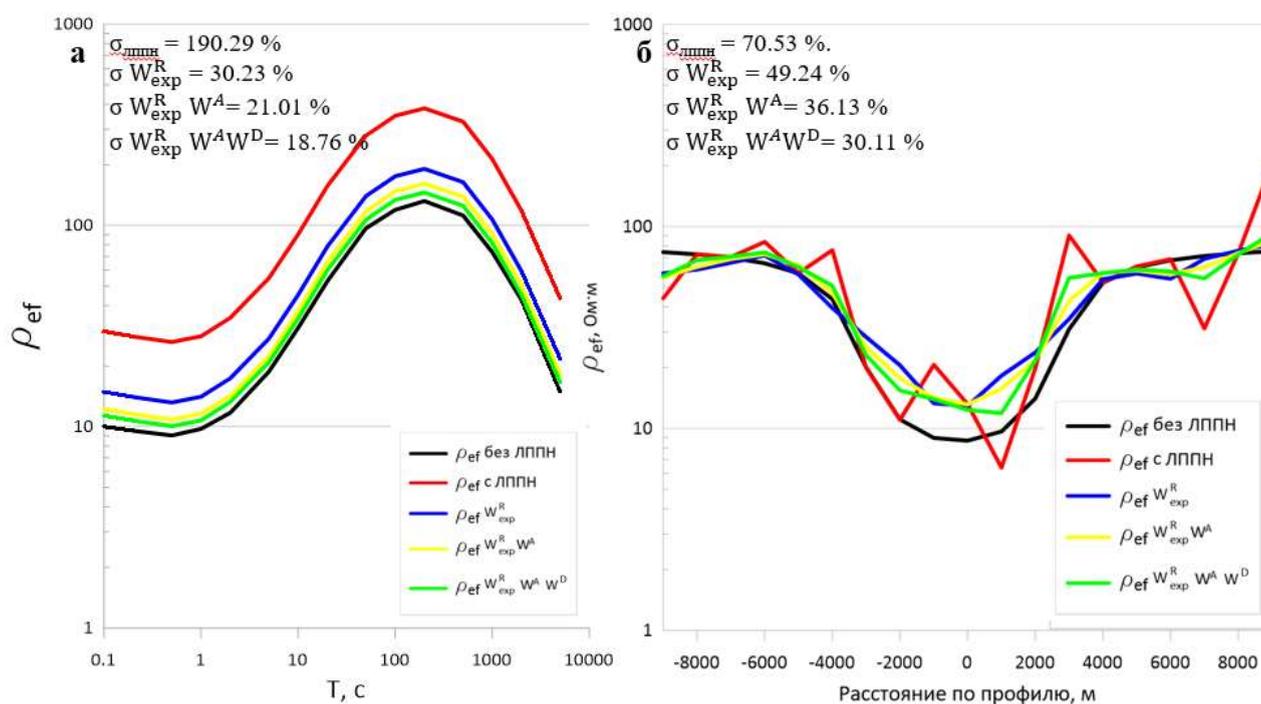


Рис. 4. Результаты нормализации для эффективного кажущегося сопротивления: а – кривые над высокоомной неоднородностью, б – графики на периоде 10 с вдоль профиля 3.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00147).

### Литература

1. Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Дмитриев В.И. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований. I. Влияние приповерхностной проводимости // Физика Земли. 1986. № 12. С. 24–38.
2. Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Анализ синтетических магнитотеллурических данных, рассчитанных для геоэлектрической модели с приповерхностными неоднородностями // Геофизика. 2023. № 6. С. 66-70.
3. Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Использование синтетических магнитотеллурических данных для оценки эффективности методов, основанных на локально-региональном разложении тензора импеданса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 185-196.
4. Jones A. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment // Geophysics. 1988. Vol. 53. P. 967-978.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ  
ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ  
ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЫ АКВАТОРИЙ

А.А. Бобачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

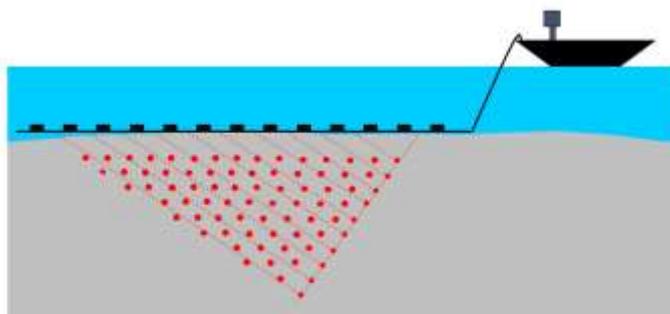
**Введение**

Электроразведка при исследованиях на различных акваториях используется уже давно [5]. Основной методикой в методе сопротивлений сегодня является электротомография, которая требует очень высокой плотности наблюдений.

Можно выделить три подхода к выполнению работ методом электротомографии (ЭТ) на акватории. Первый – добавить поплавки к обычным косам и выполнять многоэлектродные зондирования с неподвижной косой с поверхности водоема. В зимних условиях это работа с поверхности льда с пробуриванием лунки для электродов. Преимущество такого подхода - использование стандартной аппаратуры. Основная проблема - сложность зафиксировать положение косы при работе на течении и при неблагоприятной погоде (ветер).

Другой подход – использование буксируемой установки, например, методика непрерывных акваторных зондирований [1, 4]. Этот подход позволяет добиться высокой скорости полевых наблюдений. Однако при работе с поверхности акватории, вода будет первым исследуемым слоем, который обычно никому не интересен. Если глубина воды небольшая (до 5 метров), то слой воды не будет оказывать значительного влияния на результаты интерпретации. Но при увеличении глубины водоема разрешающая способность метода для изучения верхнего слоя отложений будет уменьшаться. Кроме того, при использовании таких акваторных зондирований невозможно провести наблюдения в зоне предельного мелководья (зона прибора). В результате между наблюдениями на суше и на воде возникает слепая зона.

Третий подход – использование донной установки для электротомографии. В отличие от измерений на поверхности воды, работы с донными установками проводятся достаточно редко [2,3,6]. Это, в первую очередь, связано с низкой производительностью съемки, так как работы проходят в режиме "Старт-Стоп" с полной смоткой-размоткой косы для каждой раскладки. При типичной длине косы около 300 метров это требует существенных временных и физических затрат. Основное преимущество донной расстановки заключается в том, что вода уже мало мешает исследованию донных отложений, особенно если она пресная. Это позволяет работать на достаточно больших глубинах (первые десятки метров). Кроме того, появляется возможность работать в транзитной зоне, в непосредственной близости от берега, совмещая в одной расстановке донные и поверхностные наблюдения.



**Рисунок 1.** Методика работ методов ЭТ с донной косой.

### Электротомография с донной косой

Донная электротомография похожа на стандартную сухопутную томографию с соответствующей аппаратурой. Мы использовали станцию Syscal Pro Switch 72 (IRIS Instruments, Франция), положение которой в пространстве играет важную роль. Она располагается не в центре расстановки (как обычно делают), а на краю и на некотором расстоянии от первого электрода (рис. 1). Это позволяет располагать станцию в лодке, а рабочая часть косы при этом лежит на дне водоема. Это приводит к необходимости использования специализированных электроразведочных кос (рис. 2), в которых прибор располагается не в центре расстановки, а с краю, причем ближайший электрод располагается в 20-30 метрах от измерительной станции, чтобы он достигал дна.

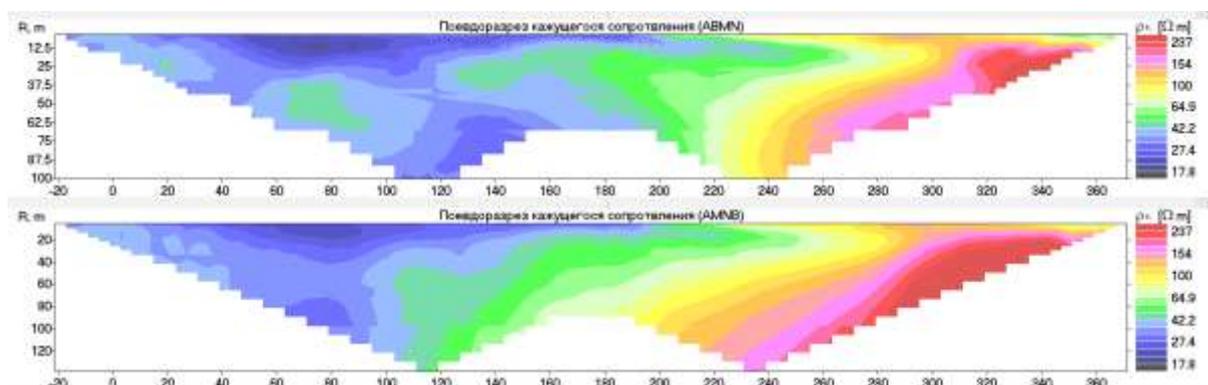


**Рисунок 2.** Донная коса при расположении станции на берегу и в лодке.

При расположении станции на берегу и подключении электродов к донной косе можно сочетать сухопутные и акваторные измерения, получая в результате непрерывный геоэлектрический разрез.

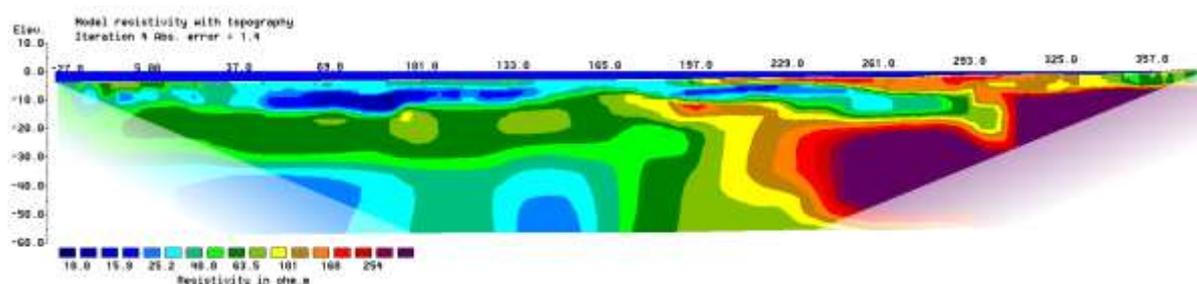
## Работы в Обской губе.

Особенностью этих полевых работ было использование донной косы при раскладке с лодки, так и при раскладке с берега (рис. 2). В результате получились следующие полевые данные



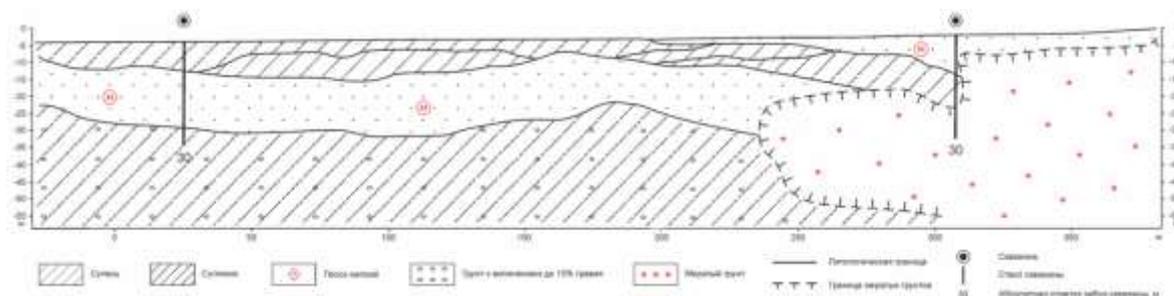
**Рисунок 3.** Псевдоразрезы кажущегося сопротивления для разных установок (сверху вниз): дипольной осевой и Шлюмберже.

В результате 2D инверсии был получен следующий геоэлектрический разрез (рис.4)



**Рисунок 4.** Геоэлектрический разрез по результатам 2D инверсии. Синим цветом показана вода.

Опираясь на априорные данные о геологии района и на данные бурения, которое выполнялось вдоль профиля электротомографии, была проведен анализ результатов 2D инверсии с последующим выделением областей с близкими значениями УЭС и сопоставлением с породами (рис. 5).



**Рисунок 5.** Геологическая интерпретация данных электротомографии

УЭС породы, в основном, определяется содержанием льда, воды и газа в порах породы. В правой части профиля (рис. 5), которая расположена близко к берегу, наблюдается

высокоомная аномалия (более 400 Ом·м), предположительно, приуроченная к зоне распространения мерзлых пород, которые были вскрыты скважиной

### **Выводы**

Электротомография является эффективным инструментом при геофизическом изучении акваторий и примыкающих к ним территорий. Наблюдения с донной установкой обеспечивают непрерывность изучения профиля "вода-суша". Также донная электротомография позволяет изучать донные отложения в широком диапазоне глубин дна: от нуля до 30-40 метров.

### **Литература**

1. Бобачев А. А., Ерохин С. А. Практика применения электротомографии на малоглубинных акваториях // Инженерные изыскания - 2011 - № 11. С. 24–29.
2. Миринец А. К., Бобачев А. А., Миронюк С. Г. Выделение мерзлых и газонасыщенных грунтов в Обской губе Карского моря по данным донной электротомографии в комплексе с акустическим профилированием и бурением // Геофизика – 2022 – №6. С. 33-41.
3. Dahlin T., Loke M.H. Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm // Near Surface Geophysics - 2018 - Vol. 16, 230-237.
4. Rucker, D.F., Noonan, G.E. 2013. Using marine resistivity to map geotechnical properties: A case study in support of dredging the Panama Canal// Near Surface Geophysics - 2013 - Vol. 11, 625-637
5. Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G.. Electrical exploration of water-covered areas. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 110 – 1934 – Pp 122–134
6. Toran, L., Johnson, M., Nyquist, J., Rosenberry, D Delineating a road-salt plume in lakebed sediments using electrical resistivity, piezometers, and seepage meters at Mirror Lake, New Hampshire, U.S.A. Geophysics - 2010 -75 (4), WA75–WA83.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ С ГРАДИЕНТОМЕТРОМ MariMag300m

ЗА 2023 И 2024 ГОДЫ

И.В. Лыгин<sup>1</sup>, А.В. Морозов<sup>1</sup>, К.М. Кузнецов<sup>1</sup>

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

В конце 2022 года геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова приобрел по программе Приоритетного научного развития отечественный морской магнитометр-градиентометр «MariMag 300m», предназначенный для измерения модуля вектора магнитной индукции и градиента магнитного поля при гидромагнитных съемках. По условиям программы прибор должен использоваться в морских научно-исследовательских рейсах, учебной работе и работа с ним должна обеспечивать поступление новых материалов, которые будут положены в написание студенческих квалификационных работ, научных статей и докладов.

За прошедшие два года:

- в ряд учебных курсов внедрены практические работы по знакомству с магнитометрическим оборудованием, освоению методики полевых работ, обработки и интерпретации данных гидромагнитных съемок [1, 2];

- проведены учебные практики по морской магниторазведке на Беломорской Биологической станции «ББС 2023, 2024». Первые студенты получили полевые навыки работы с прибором, освоили методику гидромагнитных наблюдений. Собраны уникальные материалы о геологическом строении района станции [3, 4, 5]. По результатам начата подготовка учебного пособия;

- выполнены обширные гидромагнитные исследования в рамках научного рейса 2024 года «ТТР-23» в Баренцевом и Карском морях по программе «Обучение через исследования» Всероссийской научно-образовательной программы «Плавучий Университет». Наблюдения выполнены с целью уточнения распространения ранее выделенных магматических комплексов [6, 7, 8, 9, 10, 11 12]. Общая протяженность магнитометрических профилей превысила 4500 пог. км [13];

- в рамках междисциплинарного гранта МГУ научной школы «Космос» и осенней магистерской практики выполнены магнитные исследования Шатурской группы озер предположительно метеоритной природы, которые выявили уникальные магнитные аномалии [14, 15];

- выполнены гидромагнитные исследования в Обской губе «Тамбей-2023» [16];

- разработаны новые методические подходы выполнения гидромагнитных съемок в полярных условиях, их обработки и интерпретации [17, 18, 19, 20]. Наличие накопленных компетенций позволило выполнить ряд камеральных производственных проектов;

- в рамках «Зимних дополнительных учебных геофизических практик студентов, магистрантов и аспирантов» (д. Александровка Юхновского р-на Калужской обл.) проведен ряд тестовых исследований, позволивший отработать элементы предполевой подготовки оборудования, сформулировать предложения по улучшению оборудования, выявить недостатки в работе оборудования [21]. Выявленные недостатки производитель оборудования оперативно устранил с продлением срока гарантийного обслуживания.

За 2023 – 2024 годы по темам работы с прибором опубликовано 6 статей (см. список), сделано 9 докладов на конференциях различного уровня [3, 8, 10, 15, 19, 20], защищены одна кандидатская диссертация [6], одна магистерская [17] и три бакалаврских работы [12, 16, 18].

Опыт работы приобретения дорогостоящего оборудования по программе Приоритетного научного развития МГУ авторы считают положительным.

*Исследование выполнено в целях реализации Программы развития Московского университета (Соглашение № 195 от 15 сентября 2023 г.) для обеспечения работой морского продольного градиентометра MariMag-300m.*

*Исследование выполнено в рамках государственных заданий МГУ имени М.В. Ломоносова № 5-15-2021 (Номер ЦИТИС: 121042200088-6).*

#### Литература

1. *Кузнецов К.М.* Особенности преподавания гравиразведки и магниторазведки. Результаты 6 лет // VIII Гравиметрический и магнитометрический семинар памяти профессора В.Р. Мелихова, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геофизических методов исследования земной коры, Россия, 24 мая 2024. (Устный доклад).

2. *Лыгин И.В., Золотая Л.А., Кузнецов К.М.* Устойчивое развитие гравиразведки и магниторазведки – это преемственность и перемены // Всероссийская научно-практическая конференция «Школе геофизиков МГУ – 80 лет. Переключка поколений». (Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова), Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17 мая 2024. (Устный доклад).

3. *Лыгин И.В., Ивашкина О.О., Кузнецов К.М., Соколова Т.Б., Токарев М.Ю., Лыгина Е.А., Морозов А.В.* Особенности аномального магнитного поля Нильма-Чернореченской акватории и пролива Великая Салма (Кандалакшский залив) // Геофизика. 2024. № 2. С. 31-38.

4. *Лыгин И.В., Ивашкина О.О., Кузнецов К.М., Токарев М.Ю.* Результаты гидро- и наледных магнитометрических исследований в Кандалакшском заливе Белого моря // Сборник «Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и

образование (MARESEDU-2023)». Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 23 – 27 октября 2023». Тверь. ООО «ПолиПРЕСС». 2024. Том 4. С. 115–120.

5. *Лыгин И.В., Ивашкина О.О., Токарев М.Ю., Морозов А.В., Янголенко М.В.* Результаты магнитометрических исследований пролива Великая Салма в 2024 году // Сборник «Труды XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)». Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 28 октября – 1 ноября 2024». Тверь. ООО «ПолиПРЕСС». 2025. Том 4. С. 380–383.

6. *Арутюнян Д.А.* Особенности структуры земной коры Баренцевоморского региона по геолого-геофизическим данным // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. Москва. МГУ. 2023.

7. *Арутюнян Д.А., Лыгин И.В.* Структура земной коры Баренцева моря по данным потенциальных полей // VII Гравиметрический и магнитометрический семинар памяти профессора В.Р. Мелихова, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геофизических методов исследования земной коры, Россия, 12 мая 2023. (Устный доклад).

8. *Лыгин И.В., Арутюнян Д.А.* Особенности строения земной коры Баренцева моря по результатам трехмерного плотностного и магнитного моделирования // Геофизика. 2023. № 3. С. 85-93.

9. *Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Кузнецов К.М., Соколова Т.Б., Рогозева М.А.* Картирование Мезозойского даечного комплекса в Баренцевом и Карском морях по магнитному полю // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Геосочи-2023. Актуальные проблемы геологии и геофизики». г. Сочи, Россия, 24-27 апреля 2023. – Тверь. ООО ПолиПРЕСС. 2023. Т. 1. С. 113–117.

10. *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.

11. *Лыгин И.В., Кузнецов К.М., Арутюнян Д.А., Соколова Т.Б.* Картирование дайкового комплекса Баренцева и Карского морей по магнитному полю // Сборник «Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)». Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 23 – 27 октября 2023». Тверь. ООО «ПолиПРЕСС». 2024. Том 4. С. 195–200.

12. *Рогозева М.А.* Источники магнитных аномалий в северной части Карского моря // Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. Москва. МГУ. 2024.

13. *Морозов А.В., Лыгин И.В.* Новые данные о магматических образованиях к северу от Новой Земли по данным гидромагнитных исследований в рейсе TTR-23 // Сборник «Труды XIII

Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)». Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, 28 октября – 1 ноября 2024». Тверь. ООО «ПолиПРЕСС». 2025. Том 4. С. 469–474.

14. *Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Шевалдышева О.О., Фадеев А.А.* Магнитная и плотностная модель метеоритного кратера озера Смердячье // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов. Пермь. ГИ УрО РАН. 2025. Т. 51. С. 151–156.

15. *Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Шевалдышева О.О., Фадеев А.А., Гудкова Т.В.* Моделирование магнитных и плотностных параметры метеоритного кратера озера Смердячье // Геофизика. 2024. № 6. С. 89-95.

16. *Морозов А.В.* Методика и результаты гидромагнитной съемки в бухте Тамбей // Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. Москва. МГУ. 2024.

17. *Вишняков Д.Д.* Пространственно-временная неоднородность вариаций магнитного поля // Квалификационная работа на соискание степени магистра. Москва. МГУ. 2023.

18. *Гольцова А.Ю.* Уравнивание магнитометрических данных на основе аппроксимации сплайнами // Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. Москва. МГУ. 2024.

19. *Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В.* Анализ возможностей применения спектрального способа обработки данных дифференциальной гидромагнитной съемки // Гелиогеофизические исследования. 2023. № 38. С. 46-53.

20. *Lygin I.V., Sokolova T.B., Kleschina L.N., Kuznetsov K.M., Nikitina V.A., Shirokova T.P., Krivosheya K.V., Chernikov K.S., Mazekina A.V.* Technology of Mapping of Volcanic-Sedimentary Strata in a Complexly Dislocated Terrigenous Structure according to Seismic and Magnetic Exploration Data (Pechora Sea) // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2024. Vol. 60. № 3. P. 479-493.

21. *Морозов А.В., Варченко В.С., Вишняков Д.Д.* Проверка и оценка работоспособности измерительных функций морского оверхаузеровского магнитометра-градиентометра MariMag // XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2023". Секция "Геология", Россия, 10-19 апреля 2023.

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ АНОМАЛИЙ МАСКОНОВ ЛУНЫ ПРИ ПОМОЩИ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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

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

## **Введение**

В гравитационном поле Луны широко проявлены изометричные положительные аномалии, амплитуда которых достигает 250 мГал. Впервые они были описаны в работе Мюллера и Шёргена [1] в 1968 году и названы масконами (от англ. mass concentration – концентрация масс). Чаще всего они приурочены к лунным морям, имеющим округлую форму и базальтовый приповерхностный слой [2]. Наиболее крупные из них расположены в Море дождей, Море Ясности, Море Кризисов и др. [3]. Природа их возникновения на сегодняшний день остаётся дискуссионной. Предположительно они являются результатом крупных ударных событий, произошедших на ранних этапах формирования Луны [4].

Эффекты масконов сопоставимы по амплитуде с аномалиями силы тяжести, приуроченными к элементам глубинного строения Луны. Этот факт является существенной помехой для построения геологической (селенологической) модели всего небесного тела. Таким образом необходимо разработать подход, позволяющий исключить влияние масконов из гравитационного поля. На первом этапе для этого необходимо решить задачу выделения их в аномальном поле.

В работе предложен метод локализации масконов Луны в аномалиях поля силы тяжести на основе применения свёрточных нейронных сетей (СНС).

## **Подготовка обучающей выборки**

Для выбора оптимальной архитектуры нейронной сети и определения её весов необходимо создание обучающей выборки. В практике применения машинного обучения в геологических науках можно отметить, что несмотря на большой объем материалов интерпретированной геолого-геофизической информации, единых общедоступных баз данных существует немного, что особенно актуально и для сейсмических методов, и Луны. Для решения задачи исследования создана синтетическая выборка, представляющая собой комбинации полей и маски искомым объектам (Рис. 1). Такой подход позволяет регулировать объем обучающей, тестовой и валидационной выборок [5].

В качестве аналога эффекта масконов Луны, рассмотрен эффект точечных источников масс. При этом для лучшего описания градиентов полей масконов выбрана третья производная гравитационного потенциала точечного источника, нормированная на максимальное значение.

Модель поля можно представить в виде 2-х компонент: 1) искомая аномалия и 2) помеха. Чтобы сделать синтетические данные более реалистичными, в них добавляется шум, имитирующий эффект иных геологических объектов (Рис. 1Б). Он рассчитывается как случайное распределение значений, сглаженных с помощью фильтра осреднения. Также на поле накладывается высокочастотная случайная помеха.

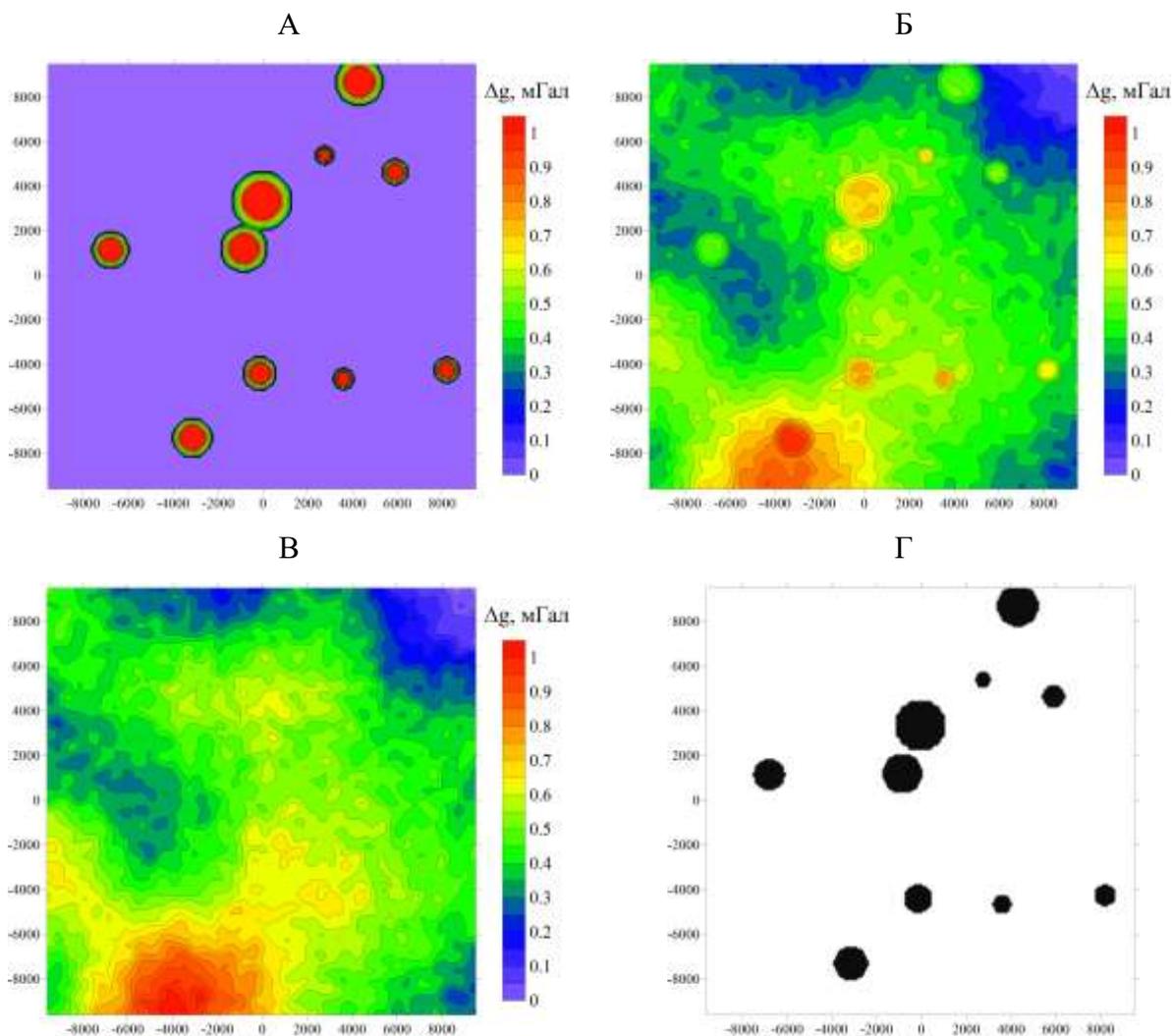


Рис. 1. Пример модели из обучающей выборки: А – гравитационные эффект точечных источников; Б – итоговая модель для обучения СНС; В – помеха; Г – положение источника, используемое для обучения СНС

Маска аномалии маскона представляется в виде бинарных меток (1 — маскон присутствует, 0 — отсутствует) (Рис. 1Г). В одном наборе данных может присутствовать от 1 до 10 масконов. Синтетическая выборка делится на обучающую, валидационную и тестовую части в соотношении 70%, 15%, 15% соответственно.

## Выбор оптимальной модели свёрточной нейронной сети

Для задачи локализации масконов в гравитационном поле Луны в качестве основы выбрана архитектура U-Net [6]. Архитектура сети представляет собой последовательность слоев свёртки и пулинга, которые сначала уменьшают пространственное разрешение данных при свёртке, а затем увеличивают его, при этом связывая данные соответствующего разрешения, как показано на рисунке 2.

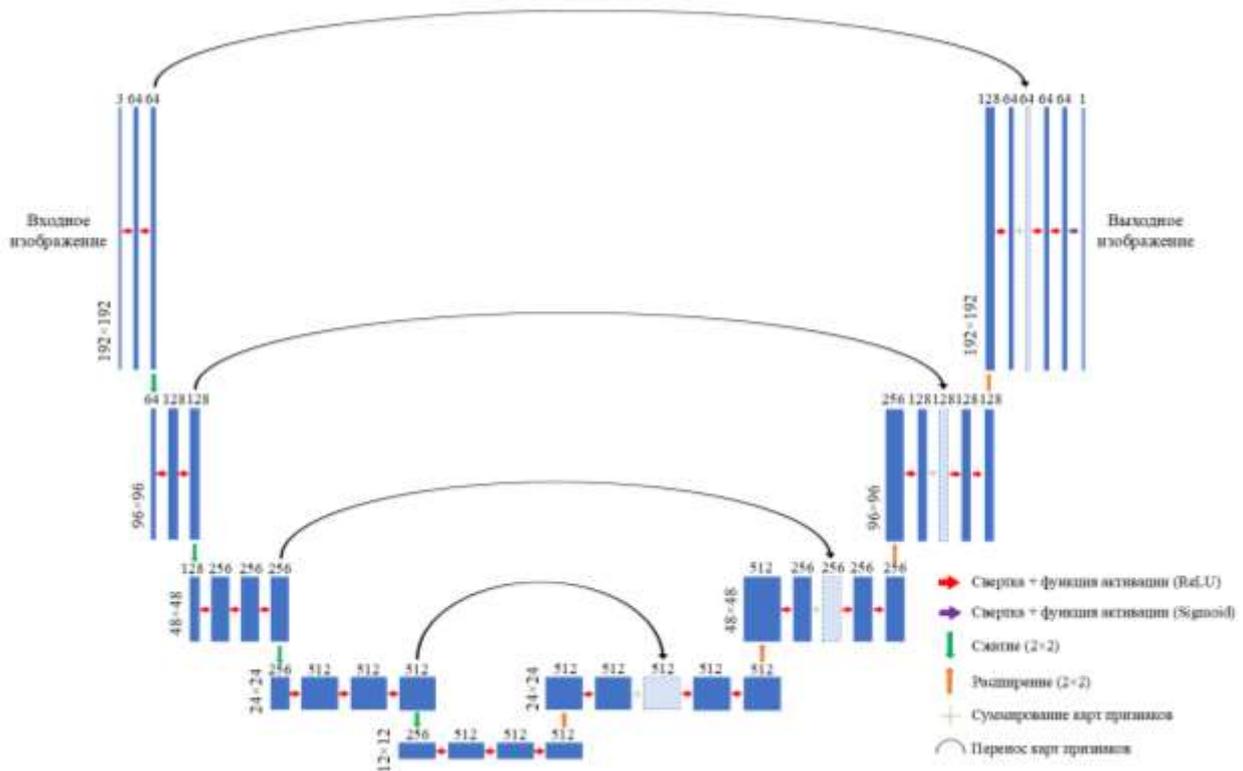


Рис. 2 Итоговая модель свёрточной нейронной сети

Изначальные веса нейронной сети задаются случайным образом. Для ускорения обучения возможно использовать веса моделей глубокого обучения. В рамках исследований по созданию нейронной сети для выделения линейных аномалий [5] потенциальных полей успешно опробованы веса сети VGG-16 [7]. Для решения задачи данной работы случайные веса левой части (декодер) U-Net (Рис. 2) также заменены на предобученные веса сети VGG-16.

### Подбор гиперпараметров

На следующем этапе полученная нейронная сеть дообучена на подготовленной выборке (Рис. 1). Для решения задачи выделения масконов подобраны следующие параметры обучения: оптимизатор – Adam, скорость обучения – 0,0001, количество эпох обучения – 20, размер батча (количество карт для одной эпохи) – 32. В качестве метрики для оценки точности выбрана метрика *IoU* (Intersection over Union), вычисляемая по формуле [8]:

$$IoU = \frac{\text{Пересечение (Intersection)}}{\text{Объединение (Union)}} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (1)$$

где  $A$  – предсказанная область;  $B$  – истинная область;  $|A \cap B|$  – площадь пересечения;  $|A \cup B|$  – площадь объединения.

Точность обучения на синтетических примерах с указанными выше гиперпараметрами по метрике  $IoU$  составила 0,96.

### Результат работы СНС на реальных данных

На рисунке 3 приведен результат применения нейронной сети к аномалиям силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя  $2,55 \text{ г/см}^3$  Луны.

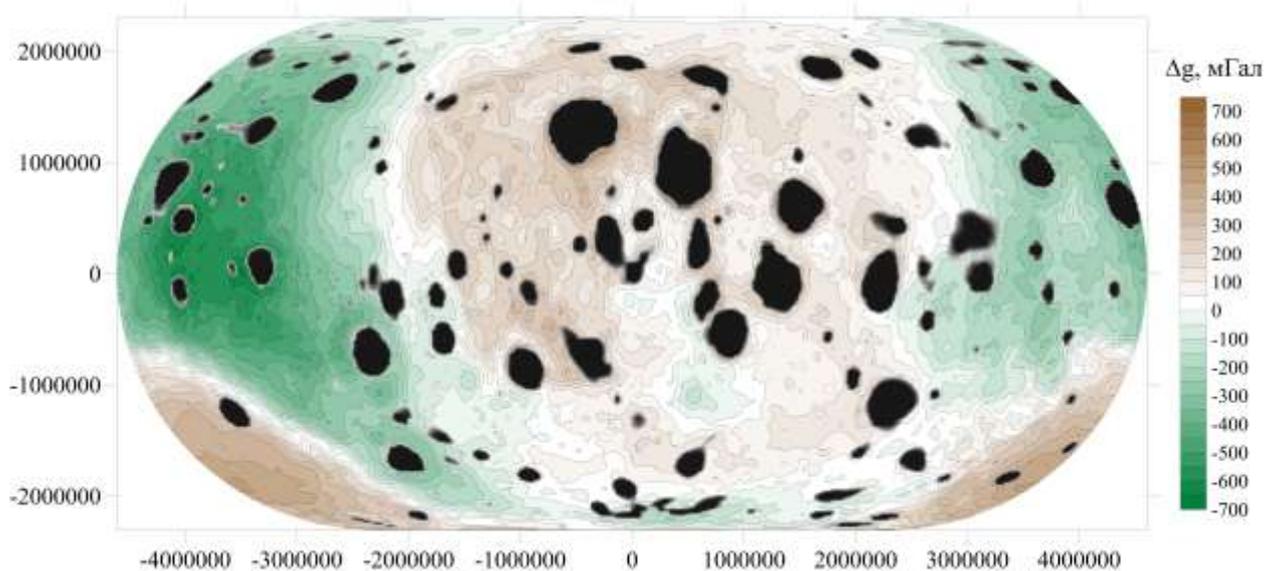


Рис. 3 Гравитационное поле Луны в редукции Буге с результатами работы СНС (чёрным цветом)

По данным, представленным в работах [9, 10] в аномалиях силы тяжести Луны выделено порядка 70 масконов. Результаты применения нейронной сети позволили выделить 92% отмеченных ранее объектов, а также выделить 20 новых. Важно отметить, что ранее масконы выделялись лишь в качестве координат экстремумов аномалий или ассоциированных с ними кратеров Луны.

### Заключение

В настоящее время технологии искусственного интеллекта активно развиваются в самых различных областях науки, в том числе и в геофизике. При этом примеров их применения в области анализа потенциальных полей представлено немного. В ходе работы разработана и применена нейронная сеть, позволяющая локализовать масконы Луны.

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

Исследование выполнено при поддержке Некоммерческого Фонда развития науки и образования "Интеллект" (Non-commercial Foundation for the Advancement of Science and Education INTELLECT).

Литература:

1. Muller P.M., Sjogren W.L. Mascons: Lunar Mass Concentrations // *Science*, vol. 161, 1968. P. 680-684. DOI: 10.1126/science.161.3842.680.
2. Wieczorek M. A., Jolliff B.L., Khan A. et al. // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, vol. 60(1), 2006. P. 221–364. DOI: 10.2138/rmg.2006.60.3.
3. Сагитов М.У. Лунная гравиметрия. – М.: Наука, 1979, 432 с.
4. Head J.W., Wilson L Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 56 (6) 1992, P. 2155-2175, DOI: 10.1016/0016-7037(92)90183-J.
5. Шклярук А.Д., Кузнецов К.М. Составление схемы линейных и изометричных аномалий потенциальных полей на основе сверточных нейронных сетей // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов.* — Т. 51. — ГИ УрО РАН Пермь: 2025. — С. 341–345.
6. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentaton // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015.* MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9351. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28
7. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*, 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556
8. Rahman M.A., Wang Y. Optimizing Intersection-Over-Union in Deep Neural Networks for Image Segmentation. *International Symposium on Visual Computing* // 2019 DOI: 10.48550/arXiv.1902.09630
9. Zhao G., Liu J., Chen B., Kaban M.K., Du, J. 3-D density structure of the lunar mascon basins revealed by a high-efficient gravity inversion of the GRAIL data // *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 126 (5), 2021, P. 1-22, DOI: 10.1029/2021JE006841
10. Neumann GA, Zuber MT, Wieczorek MA, Head JW, Baker DM, Solomon SC, Smith DE, Lemoine FG, Mazarico E, Sabaka TJ, Goossens SJ, Melosh HJ, Phillips RJ, Asmar SW, Konopliv AS, Williams JG, Sori MM, Soderblom JM, Miljković K, Andrews-Hanna JC, Nimmo F, Kiefer WS. Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements // *Science Advances* vol. 1(9), 2015, P. 1-10, DOI: doi: 10.1126/sciadv.1500852

ОЦЕНКА ГЛУБИН ЗАЛЕГАНИЯ ФУНДАМЕНТА  
В ПРЕДЕЛАХ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА  
И СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО АНОМАЛИЯМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Н.А. Гарамов<sup>1,2</sup>, Л.А. Золотая<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>АО ГНПП *Аэрогеофизика*, г.Москва,  
<sup>2</sup> *Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

Статья посвящена изучению зоны сочленения Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП) с Сибирской платформой. Это самостоятельная геоструктура, которая сформировалась в позднем палеозое и характеризуется высокоамплитудными перегибами на сейсмических разрезах. Зона, с варьирующей шириной от 230 км до 650 км, протягивается на расстояние около 1100 км и от низовьев реки Енисей к эстуарию Хатанги рассматривается как единая пограничная или межблоковая тектоническая структура, прошедшая собственный путь геологического развития, с присущими ей морфологическими чертами и являющаяся перспективной зоной для обнаружения большого комплекса полезных ископаемых. На западе ЕХП сливается с Западно-Сибирским бассейном, а на востоке – отделён седловиной от Лено-Анабарского периферического прогиба Сибирского кратона [1,2].

Территория изучения несколько десятилетий привлекает внимание геологов и геофизиков, но несмотря на это, она имеет различную степень геофизической изученности. В условиях отсутствия детальной сейсмической информации задача определения рельефа поверхности фундамента и глубин интрузивных объектов становится критически важной для реконструкции геологического строения и идентификации магматических комплексов. Авторы статьи предлагают использовать данные аномальных значений площадных гравиметрических и магнитных съемок масштаба 1:50 000, полностью покрывающих площадь исследования, с привлечением данных о рельефе земной поверхности, глубины поверхности Мохо, а также данные геофизического исследования скважин (ГИС) по шести методам.

На первом этапе, после проведения разно частотных трансформаций с целью выделения региональных и локальных аномалий, были получены сложные регрессионные зависимости между глубинами фундамента вдоль сейсмических профилей и магнитными и гравитационными аномалиями для определения рельефа поверхности фундамента в сложных геолого-тектонических условиях. Отметим, что по магнитным аномалиям на участках, где осадочный чехол немагнитен были установлены высокие значения коэффициенты корреляции, позволяющие в отсутствии данных сейсморазведки надежно прогнозировать глубины фундамента.

В исследовании предложена методика, основанная на комбинации линейных и ансамблевых моделей машинного обучения, обученных на имеющихся геолого-геофизических

данных тестового участка 1 (территория Енисей-Хатангского прогиба) и примененных на прогнозном участке 2 (Северо-Сибирская моноклиза) (рис.1). Точность прогнозирования глубин интрузивных объектов оценивалась на участке 3, расположенном на северо-западной территории Анабарского щита.

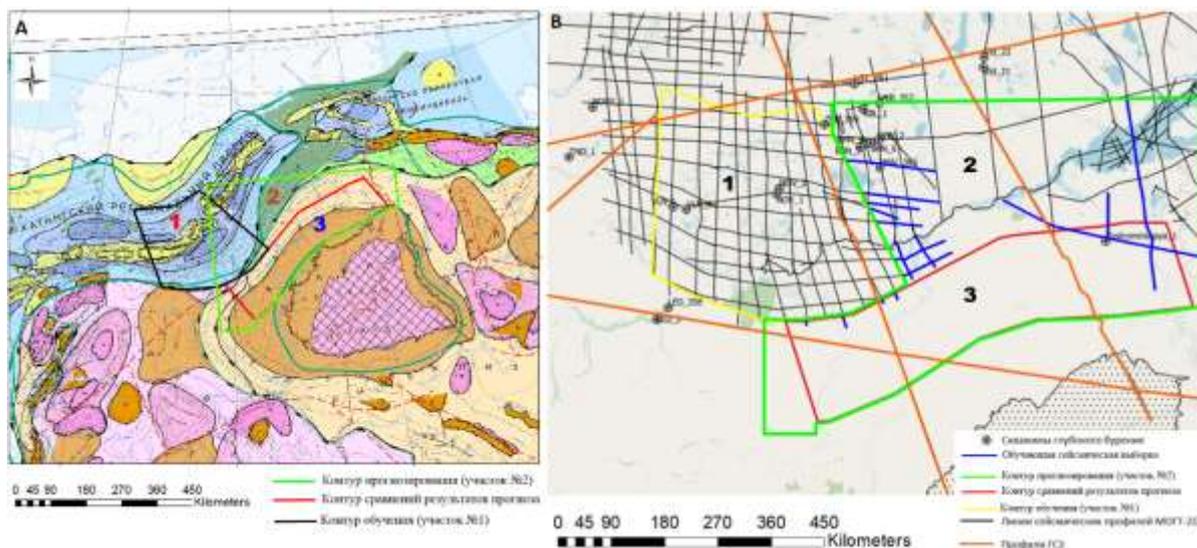


Рис. 1. Положение участков моделирования на фоне тектонической карты (А) совместно с изученностью сейсмическими методами (В)

Авторами были рассмотрены линейные методы регрессии и алгоритмы градиентного бустинга [3,4]. Для минимизации переобучения и повышения точности модели объединялись в стэкинг-ансамбль через мета-обучатель (StackingRegressor). На участке №1, где залегает 20 магматических объектов (пластовые интрузии долеритов и гранофиров), проведена кросс-валидация с подбором гиперпараметров. На участке №2, содержащем 43 объекта (триасовые дайки, силлы и центральные интрузии дунитов), использовалась обученная модель для прогноза глубин рельефа поверхности фундамента.

Для линейных моделей были оптимизированы параметры регуляризации ( $L1$ ,  $L2$ ). В качестве линейной модели использовался регрессор ElasticNet, который сочетает в себе оба типа регуляризации. В ансамблевых методах (XGBoost, CatBoost, HistGBM, LGBM) важность признаков оценивалась через встроенные в данные алгоритмы метрики, подтвердив доминирование низкочастотных магнитных сигналов.

В качестве метрик использовались среднеквадратические оценки RMSE и MAE. Ошибки определялись по следующим формулам:  $RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}$ ,

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

Где:  $N$  – количество наблюдений;  $y_i$  – фактическое значение  $i$ -го наблюдения;  $\hat{y}_i$  – предсказанное значение  $i$ -го наблюдения.

Наименьшая ошибка в определении глубин фундамента, обозначенная как RMSE составила 136 м и достигнута в результате применения алгоритма градиентного бустинга XGBoostRegressor. Это объясняется обоснованным учетом нелинейных зависимостей предикторов (низкочастотных аномалий с целевой переменной) и высокой производительностью алгоритма на табличных данных [2].

Прогноз на участке №2 выявил следующие особенности (рис.2):

1. На участке №2 глубины верхних кромок фундамента лежат в пределах от 1 км до 16 км, погружаясь на юго-запад
2. Средний угол наклона поверхности фундамента составляет доли градусов
3. В юго-западной части участка №2 наблюдается поднятие фундамента (до глубин 4 км), продолжающееся за пределы контура на юго-запад

В завершении на прогнозном участке №3, где практически отсутствовали сейсмические данные выявлена тенденция погружения фундамента также на юго-запад от 1.5 км до 12 км.

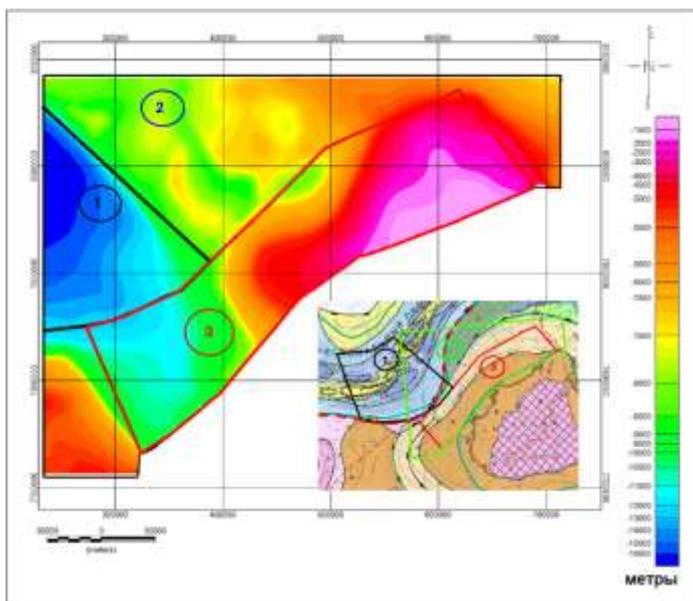


Рис. 2. Спрогнозированная поверхность глубин фундамента алгоритмом XGBoostRegressor на участках 2 и 3

Верификация прогноза выполнена по данным бурения и геологическим разрезам. Установлено, что максимальная насыщенность интрузиями на участке 2 действительно приурочена к верхнему километру разреза, что согласуется с палеозойскими образованиями. Методика подтвердила возможность экстраполяции данных между структурно разнородными участками, что особенно актуально для слабо изученных регионов Сибири. Точность прогноза на участке сравнения №3 составила 173 м по метрике RMSE и 81 м по метрике MAE. Результаты сравнения представлены на рис.3.

Модель воспроизводит общий тренд глубин, включая разделение фундамента на тектонические блоки различной средней глубины фундамента. Наблюдается хорошее

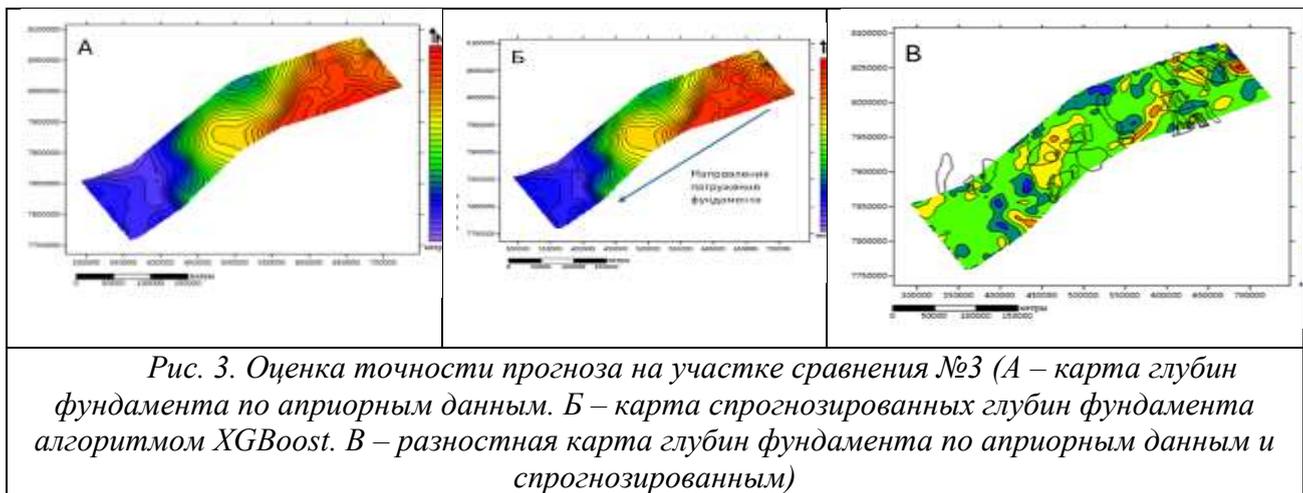


Рис. 3. Оценка точности прогноза на участке сравнения №3 (А – карта глубин фундамента по априорным данным. Б – карта спрогнозированных глубин фундамента алгоритмом XGBoost. В – разностная карта глубин фундамента по априорным данным и спрогнозированным)

соответствие с фактическими данными, где обучение модели проводилось на достаточном объеме данных (юго-западная часть). В зоне сложного строения (северо-восточная часть) наблюдаются локальные расхождения. На разностной карте отрицательные значения указывают на занижение прогноза глубины фундамента, положительные — на их завышение. В северо-восточной и центральной части высокая ошибка принадлежит зонам распространения крупных магматических тел (по результатам моделирования). Юго-западная часть имеет наименьшую ошибку и хорошо соответствует исходным данным.

Таблица 1. Метрики качества моделей машинного обучения на прогнозном (валидационном) участке №2

Type of model	Model	RMSE (m)	MAE (m)
Linear	Ridge	Not Applied	Not Applied
Linear	Lasso	Not Applied	Not Applied
Linear	ElasticNet	833	624
Decision trees	RandomForest	Not Applied	Not Applied
Gradient Boosting	XGBoost	136	60
Gradient Boosting	LGBM	141	65
Gradient Boosting	CatBoost	149	77
Gradient Boosting	HGBM	147	72
Gradient Boosting	GBM	Not Applied	Not Applied
Merged	StackingRegressor	417	317
Участок сравнения	XGBoost	173	81

На заключительном этапе по использованным для прогноза пяти моделям были получены итоговые метрики получаемого качества прогноза глубин, обученных кросс-валидацией на участке №1, моделей представлены в таблице 1. Отчетливо видно, что несмотря на одинаковое качество входных геофизических данных, выбор модели машинного обучения и методы расчета значительно влияют на точность прогноза глубин

фундамента .

## **Выводы по эффективности моделей машинного обучения:**

- Лучшая модель: XGBoost продемонстрировала наилучшую точность прогноза глубин на обучаемом участке №1 с метриками  $RMSE = 136$  м и  $MAE = 60$  м.
- Бустинговые модели (XGBoost, LGBM, CatBoost) показали значительно лучшие результаты прогнозирования глубин магматических тел, чем линейные (ElasticNet) и Stacking.
- Линейные методы ( $RMSE > 800$  м) оказались непригодными для сложных нелинейных зависимостей в данных.
- Stacking-модель ухудшила прогноз из-за неоптимальной комбинации базовых алгоритмов.

По результатам проведенного прогноза на участке №2 установлено, что наилучшие результаты по прогнозу глубин фундамента получены с моделью XGBoost, обеспечившей высокую точность прогноза:  $RMSE = 173$  м и  $MAE = 81$  м, что хорошо согласуется с результатами глубин фундамента, полученными на обучающем участке №1. В дальнейшем предлагаем при применении машинных алгоритмов обучения экспериментировать с ансамблевыми методами, учитывающими специфику магматических тел.

Выполненные исследования имеют высокую практическую значимость для прогноза глубин фундамента для сложных геолого- тектонических условий зоны сочленения Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП) с Сибирской платформой и прогнозированию перспективных зон на поиски полезных ископаемых. Полученные результаты позволяют авторам рекомендовать использование данных гравиметрических и магнитных съемок масштаба 1:50000, позволяющих с высокой точностью решать задачи прогноза глубин магматических объектов фундамента с опорой на сейсмические данные и материалы ГИС, а также значительно сокращать риски при выполнении поискового бурения.

## **Литература**

1. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, No 8. – С. 1027-1050.
2. А.П. Афанасенков, И.В. Лыгин, А.Н. Обухов и др. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика-2017, N2 -С. 60-70.
3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. — 2nd ed. — Springer, 2009. — 746 p.
4. Menke W. Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice. — Academic Press, 2018. — 303 p.

## МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ РАДИОМЕТРИИ С БИТУМОИДАМИ В КАРБОНАТАХ

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

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

Целью работы является изучение связи битумоидных высокомолекулярных соединений (ВМС) с данными геофизических исследований скважин (ГИС) и петрофизики для карбонатных отложений Оренбургского месторождения.

Карбонаты, рассматриваемых месторождений, представляют собой примеры сложнопостроенных коллекторов, состоящих из известняков и доломитов, ангидритов, заглинизированных в различной степени, или их разностей с включениями битумоидов. Ниже приводится анализ вариаций вещественного состава пород, фациальных факторов, уточнение природы радиоактивности и ее связи с битуминозностью по всему продуктивному интервалу скважины с применением кластерного анализа [1].

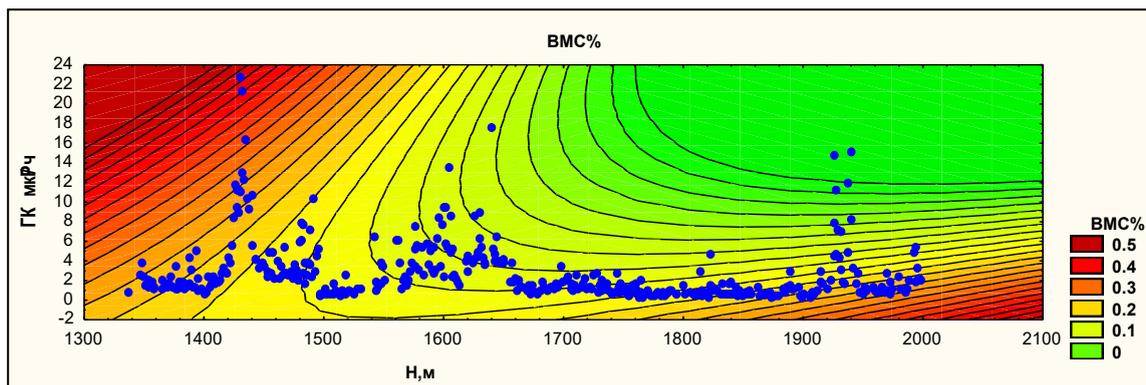


Рис.1. Распределение ВМС% и Гамма (мкР/ ч) по глубине скважины (Н, м).

Объяснение природы радиоактивности (ГК, U, Th, K) пород и уточнение ее связи с компонентным составом (асфальтены, масла, смолы) битумоидных высокомолекулярных соединений (ВМС) производится на примерах диапазонов по глубине скважины с аномальными значениями ГК – (1350м.-1500м.), (1550м.- 1650м.). На рис.1 видно, что связь показаний ГК с ВМС меняется с положительной на отрицательную. Для выяснения причины такой зависимости применялся метод кластерного анализа, позволяющего через объединение в группы измеряемых параметров анализировать процессы их взаимоотношений.

В математической статистике — мера расстояния (группирование) между векторами случайных величин, обобщающее понятие евклидова расстояния (расстояние Махаланобиса).

Самый простой подход заключается в вычислении среднеквадратичного отклонения точек множества от центра масс. Если расстояние между заданной точкой и центром масс меньше среднеквадратичного отклонения, то можно заключить, что вероятность принадлежности точки множеству высока. Чем дальше точка, тем больше вероятность того, что она не принадлежит множеству.

На рис.2 представлена, обобщенная по глубине (1350м.-1500м.) дендрограмма. Входными параметрами являются ВМС с компонентами (масло, легкие, тяжелые смолы, асфальтен), U, Th, K, Гмин, Кпор.эф., где Гмин. представляет минералогический состав пород, а Кпор.эф. - коэффициент эффективной пористости.

Указанный диапазон по глубине скважины, предположительно, принадлежит нефтематеринской зоне со слабой степенью преобразованности органического вещества (ОВ) [2]. С такими породами часто генетически связывают радиоактивность (U, Th, K) и в первую очередь уран, который может входить в минеральную фазу ОВ.

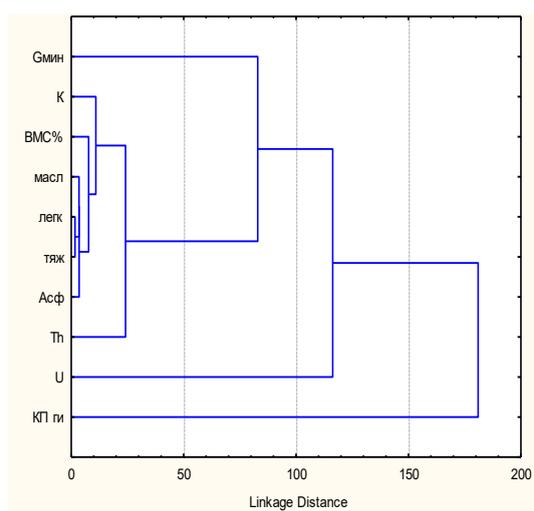


Рис.2. Дендрограмма по глубине (1350м.-1500м.)

Однако, из рисунка видно, что в объединенную группу с органикой (ВМС), в большей степени входят калий и торий, а уран входит в удаленную, слабосвязанную между собой, группу Кпор.эф – U – Гмин., что может указывать на начало распада твердого полимера ВМС с образованием подвижных компонентов (асфальтены, масла, смолы), включая уран. Увеличение подвижности урана объясняет его сопричастность с пористостью горных пород слагающих данный разрез.

На рис.3 представлена, обобщенная по глубине (1550м.- 1650м.) дендрограмма.

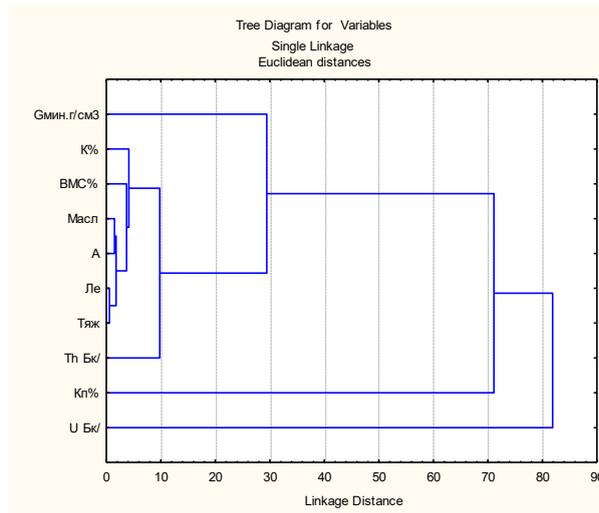


Рис 3. Дендрограмма по глубине (1550м.- 1650м.).

В отличие от первого диапазона, порода принадлежит нефтематеринской зоне с большей степенью преобразованности органического вещества. Калий и торий, в группе с органикой (ВМС), объединяются еще в большей степени, однако уран удаляется от ВМС еще больше, возглавляя слабосвязанную между собой, группу– U- Кпор.эф - Гмин., что может указывать на продолжение распада твердого полимера ВМС и увеличение подвижности урана.

На рис 4 представлено 3-х мерное распределение ВМС, гаммаметрии (ГК) и пористости пород (Кп). В зонах 1-3 связь ВМС - Кп положительна (плотная нефтематеринская порода с ОВ), а в зонах 2-4 связь отрицательна (порода с высокой вторичной пористостью и радиоактивностью).

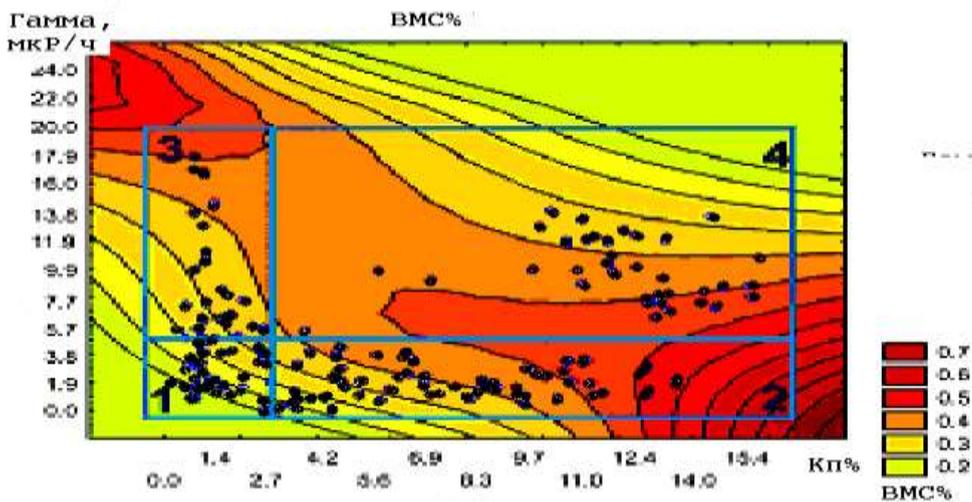


Рис.4. 3-х мерное распределение ВМС, гаммаметрии (ГК) и пористости пород (Кп).

### **Заключение:**

Результаты изучения связи типа битумоидов (ВМС) с данными ГИС карбонатных отложений Оренбургского месторождения выявило следующее:

- полученные результаты позволяют по данным каротажа (ГМ-С), и петрофизики формулировать предварительные критерии выделения нефтематеринских интервалов карбонатных пород и их статистических оценок;
- уверенной связи ВМС с ураном выявить не удалось. Исключением являются чистые низкопористые, непроницаемые известняки с содержанием урана и ОВ ниже среднего значения и низкой преобразованности керагена;
- высокие значения урана и ВМС не связаны между собой и расположены в доломитизированных известняках, мергелях с включениями гипса, что связано с их приуроченностью к определенной фациальной зоне и наложенными преобразованиями ОВ.

### **Литература.**

1. Боровиков В.П. Статистика 6 для Windows, М., 1998.
2. Пеньков В.Ф. Уран и углеводороды. М., Недра, 1989, 143 с.
3. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. М., изд-во Московского университета, 2000, 235 с.
4. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин.: Справочник. Под ред. М.М. Добрынина, М.: Недра, 1988.