

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
2021

Содержание:

1. Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных в Южном Приладожье
В.А. Куликов, А.П. Ионичева 2
2. Беспилотные воздушные суда. Опыт применения в магниторазведке. Перспективы
использования в гамма-спектрометрии
И.Н. Модин, А.Ю. Паленов, Н.Л. Шустов 4
3. Формальная и неформальная регуляризация при решении обратной задачи
гравиразведки
Л.С. Чепиго, И.В. Лыгин 6
4. Анализ результатов лабораторных методов определения магнитных свойств
магматических пород бодракской свиты
А.В. Филиппович, Л.А. Золотая, И.В. Федюкин 9

ТРЕХМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЮЖНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

В.А. Куликов¹, А.П. Ионичева¹

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

Введение

Ладожская аномалия электропроводности является одной из наиболее изученных коровых аномалий электроразведочными методами коровых аномалий на территории России, но большая часть магнитотеллурических (МТ) зондирований была выполнена в Северном Приладожье. Южная часть Ладожской аномалии изучалась в меньшей степени. Это связано с двумя причинами: а) сильной зашумленностью территории электрифицированными железными дорогами С. Петербург – Мурманск и С. Петербург – Вологда; б) усилением экранирования глубинных структур за счет увеличения мощности и, соответственно, суммарной продольной проводимости (S) осадочного чехла.

В 2013 году для дальнейшего и более детального изучения глубинной электропроводности в районе Ладого-Ботнической шовной зоны, была образована Рабочая группа ЛАДОГА, в которую вошли сотрудники кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, геоэлектрики Института геологии КарНЦ РАН, ИФЗ РАН и сервисной геофизической компании ООО «Северо-Запад».

На первом этапе, в период с 2013 по 2018 гг., основные работы группы ЛАДОГА были сосредоточены в Северном и СВ Приладожье [Соколова, 2016; Куликов и др., 2019]. Начиная с 2018 года, для изучения южных отрогов Ладожской аномалии, основной объем работ был перенесен в Южное Приладожье, где с 2018 по 2021 гг. были организованы 4 экспедиции, снято более 80 точек МТЗ, построены и проанализированы карты параметров тензора импеданса, проведен первый вариант трехмерной инверсии МТ-данных Южного Приладожья.

Результаты работ

Качественный анализ МТ-данных показывает, что в Южном Приладожье мы имеем дело со сложной трехмерной геоэлектрической моделью земной коры, сформировавшейся в результате наложения тектонических элементов и палеорифтовых систем разного направления – северо-западного, отвечающего Ладожско-Ботнической зоне, и северо-восточного, отвечающего простиранию Южнофинляндского гранулитового пояса [Морозов и др., 2010]. Если для построения геоэлектрической модели Ладожской зоны можно было использовать в качестве основного инструмента интерпретации двумерную инверсию, то в сложных условиях Южного Приладожья единственным возможным инструментом

интерпретации МТ-данных является трехмерная инверсия, учитывающая влияние всех аномалиеобразующих объектов. Сложное геологическое строение изучаемого региона отражается во всех геофизических полях наложением аномалий разной ориентации.

Важным новым результатом, который дала нам 3D инверсия, является построение объемной модели Ладожской коровой зоны в Южном Приладожье. В рамках 3D инверсии мы объединили данные магнитотеллурических зондирований, полученных в разные годы и с разной аппаратурой, в частности, согласовали материалы группы ЛАДОГА и профиля 1-ЕВ.

Контрастная проводящая структура, выявленная в западной части профиля L21, не относится к Ладожской коровой аномалии, как это предполагалось ранее, при интерпретации данных опорного профиля 1-ЕВ. Она имеет северо-восточное простирание и маркирует северную границу широкого палеорифтового пояса, разделяющего Фенноскандию с одной стороны и Сарматию и Волго-Уралию с другой.

Существование данной проводящей структуры было предсказано Игорем Ивановичем Рокитянским в работе [Рокитянский и др., 1982] по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных в разных участках Восточно-Европейской платформы в начале 80-х годов прошлого столетия.

Литература

Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на СЗ европейской части СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 101–106.

Соколова Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Рокитянский И.И., Таран Я.В., Яковлев А.Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности. Геофизика. 2016. № 1. С. 48-61.

В. А. Куликов, Е. Ю. Соколова, Д. О. Десятов и др. Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю Кириши-Подпорожье 2018г. // Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки "ГеоЕвразия-2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии". — Москва, 2019. — С. 446–452.

БЕСПИЛОТНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ СУДА.
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В МАГНИТОРАЗВЕДКЕ.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ

И.Н. Модин¹, А.Ю. Паленов¹, Н.Л. Шустов¹

¹ -Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Введение

Развитие беспилотной авиации и, соответственно, резкое уменьшение стоимости беспилотных воздушных судов (БВС) определяет рост применения различных геофизических методов с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основные преимущества такого подхода - увеличение скорости производства геофизических работ и независимость от проходимости местности. Увеличение высоты, то есть расстояния от датчиков до исследуемой среды и сложности фиксации датчиков можно отнести к недостаткам. Встречное развитие электронных регистрирующих систем, миниатюризация компьютеров, увеличение частоты опроса геофизических датчиков позволяют бороться с неизбежно возникающими помехами воздушной съемки методом увеличения накопления сигнала.

Для того, чтобы использовать одно из главных преимуществ беспилотной авиации - миниатюрность современных БВС - необходимо рассматривать те геофизические методы, которые позволяют разрабатывать миниатюрные (весом до 3 кг) датчики физических полей. Современные БВС - это очень разнообразные летательные аппараты с различным собственным весом, весом полезной нагрузки и скоростями полета. Наиболее миниатюрными являются БВС мультироторного типа, силовая установка которых представляет из себя от 4 до 8 электрических двигателей с несущими лопастями.

Применение БВС в магниторазведке.

Миниатюрность датчиков магнитного поля (протонных, квантовых, феррозондовых) определяет широкое применение магниторазведки в варианте работы с БПЛА. На учебно-научном полигоне "Александровка" (Калужская обл.) проводились испытания комплекса БВС G1000 и протонного магнитометра ММРОС-1аеро. Работы проводились как на настроенном профиле длиной 2.5км, так и на площади в 2кв.км в разное время года. Были задействованы два типа подвеса датчиков: на гондоле с вносом от БВС 7м и на не скручиваемом подвесе длиной 3м.

Опыт этих работ показал, что ротационная погрешность для гондольного варианта подвеса достаточно высока: до 7нГл. Тогда как использование не скручиваемого подвеса

позволило добиться погрешности 1нТл. Результаты площадной съемки на фиксированной барометрической высоте 60м представлены на рис. 1.

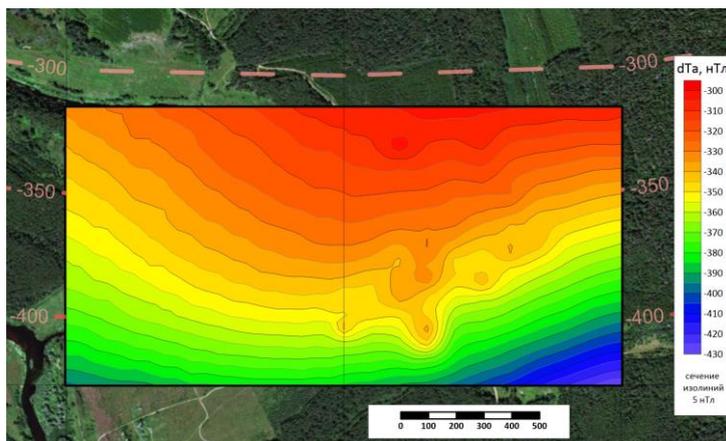


Рис.1. Результат магнитометрической съемки с борта БВС с высоты 60м с использованием не скучиваемого подвеса протонного датчика.

Перспективы использования БВС в гамма-спектрометрии.

Особенностью современных датчиков для получения спектра гамма-излучения является прямая зависимость их объема и, соответственно, веса от чувствительности. Однако, существуют миниатюрные весом до 3 кг датчики объемом до 0.4 литра (например, GS-1), обеспечивающие приемлемую чувствительность с учетом увеличения плотности наблюдений при уменьшении скорости БВС до 5м/с и вплоть до зависания над определенными точками. Именно такой режим работы позволяют поддерживать мультироторные БПЛА. Проведенные теоретические исследования дали относительно невысокую величину затухания гамма-излучения с высотой - примерно 0.75 на высоте 40м. Кроме того, выяснилось, что затухание от листвы деревьев также незначительно и эквивалентно затуханию от слоя воды в 1мм. Использование легких датчиков в комплексе с мультироторным БВС делает перспективным применение такого комплекса при поиске не только радиоактивных горных пород, но и слабоконтрастных по излучению объектов.

Возможности легких БВС в электроразведке.

Большинство электроразведочных методов используют искусственные источники электромагнитного поля. Таким образом, при применении с БВС можно говорить только о приемных датчиках. Однако здесь можно дополнительно использовать такие возможности как градиентометрия и измерение фазовых характеристик поля с применением неподвижной наземной базовой станции. Такой подход позволит увеличить чувствительность и помехозащищенность системы.

ФОРМАЛЬНАЯ И НЕФОРМАЛЬНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Д.С. Чепиго¹, И.В. Лыгин¹

¹ Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Решение обратной задачи гравirazведки для сеточных моделей не является единственным и требует учета априорной информации. Традиционно при автоматизированном подборе плотностных моделей используется формальная регуляризация, накладывающая ограничения на условие решаемой задачи путем добавления дополнительного функционала $\Phi(\sigma, x, y, z)$ к функционалу невязки [Тихонов, 1979], характеризующего отклонение между наблюдаемыми аномалиями гравитационного поля Δg_{obs} и рассчитанными аномалиями для подобранной модели Δg_{calc} . Функционал $\Phi(\sigma, x, y, z)$ умножается на параметр c , характеризующий степень влияния регуляризации. Решение обратной задачи с регуляризацией осуществляется путем минимизации суммарного функционала невязки L :

$$L = \|\Delta g_{calc} - \Delta g_{obs}\|^2 + c\Phi(\sigma, x, y, z) \rightarrow \min$$

Минимизация функционала L может осуществляться с помощью методов оптимизации, в частности, с помощью метода градиентного спуска:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n - \alpha \nabla_{\sigma} L,$$

где σ_n – текущее распределение плотности, σ_{n+1} – распределение плотности после шага градиентного спуска, $\nabla_{\sigma} L$ – градиент функционала L , α – параметр, задающий масштаб изменения плотности на каждой итерации.

В Таблице 1 приведены некоторые «распространенные» ограничения, накладываемые на плотностную модель и соответствующие выражения для $\Phi(\sigma, x, y, z)$:

Таблица 1. Примеры формальных регуляризирующих функционалов

Тип формальной регуляризации	Выражение для $\Phi(\sigma, x, y, z)$
Минимальное отклонение подобранного распределения плотности (σ) от начального (σ_0)	$\ \sigma - \sigma_0\ ^2$
Гладкость модели	$\ \frac{\partial \sigma}{\partial x}\ ^2 + \ \frac{\partial \sigma}{\partial y}\ ^2 + \ \frac{\partial \sigma}{\partial z}\ ^2$
Подбор заданной избыточной плотности σ_0	$\Phi = \ \sigma(\sigma - \sigma_0)\ ^2$

Ограничения, которые можно наложить с помощью формальной регуляризации, не являются достаточными для полноценного учета априорных данных, поскольку данные ограничения не учитывают форму границ и распределение неоднородностей в разрезе. Вследствие этого возникает необходимость создания «неформальных» подходов к регуляризации, позволяющих в полной мере учитывать априорную геолого-геофизическую информацию при построении плотностных моделей.

Неформальная регуляризация возможна путем использования параметра c , зависящего от координат. В частности, в качестве параметра c можно использовать степенную функцию для включения в процесс подбора глубоких ячеек [Li et al., 1996; 1998]. Такой подход может потребовать большого количества итераций при численном решении, поэтому предлагается осуществлять неформальную регуляризацию путем использования переменного параметра α , также зависящего от координат, без добавления дополнительных слагаемых к функционалу невязки [Cherigo et al., 2020; Чепиго, Лыгин, 2021].

В Таблице 2 приведено несколько вариантов неформальной регуляризации и соответствующие им выражения для α :

Таблица 2. Примеры формальных регуляризирующих функционалов

Тип неформальной регуляризации	Выражение для $\alpha(x, y, z)$
Учет распределения неоднородностей на начальной модели	$\alpha_0(\sigma_0(x, y, z) - \overline{\sigma_0(x, y, z)}^{xy})$
Учет формы границ $h(x, y)$	$\alpha_0 \nabla h (x, y)f(x, y, z)$
Привязка центров масс к заданной поверхности $z_0(x, y)$	$\alpha_0 e^{(z-z_0(x, y))^2}$

Первый тип неформальной регуляризации подразумевает подбор избыточных плотностей в областях с отклонениями плотности от среднего значения на горизонтали. Чем больше модуль отклонения плотности в ячейке от среднего значения на горизонтали, тем больше значение α .

Второй тип неформальной регуляризации позволяет учитывать кривизну кровли и подошву слоя. Распределение параметра α строится на основе градиента глубин границ, который умножается на функцию $f(x, y, z)$, которая задает гладкое убывание к нулю при приближении к середине слоя.

В случае наличия априорной информации о глубине залегания плотностной неоднородности возможно применять третий тип неформальной регуляризации. В этом случае максимальные значения параметра α можно относить к заданной криволинейной

поверхности $z_0(x,y)$ и гладко уменьшать при удалении от нее. Положение поверхности может быть отнесено к определенной части слоя (кровля, подошва, середина).

При плотностном моделировании рекомендуется последовательное использование нескольких вариантов неформальной регуляризации. Неформальная регуляризация расширяет возможности учета априорной информации. Необходимо отметить, что при использовании подхода неформальной регуляризации возможно учитывать априорные распределения параметров, которые нет необходимости (или невозможно) пересчитывать в распределение плотности.

Литература

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач // М: Наука –1979. – 283 с.
2. Чепиго Л.С., Лыгин И.В. Коррекция глубинно-скоростной модели на основе сейсмогравитационного моделирования (Устный) // Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях», Онлайн, Россия, 2-4 марта 2021
3. Chepigo L., Lygin I., Bulychev A. Gravity inversion with depth normalization (Устный) // European Geosciences Union General Assembly 2020, Вена, Австрия, 3-8 мая 2020
4. Li Y., Oldenburg W. 3-D inversion of magnetic data // Geophysics 1996, 61 (2), 394 – 408 p.
5. Li Y., Oldenburg W. 3-D inversion of gravity data // Geophysics 1998, 63 (1), 109 – 119 p.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД БОДРАКСКОЙ СВИТЫ.

А.В. Филиппович, Л.А. Золотая, И.В. Федюкин (ИФЗ РАН)

В представленном докладе обозначены цели палеомагнитных исследований на территории юго-восточной части Качинского антиклинория Крыма в левом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка. Изучение магнитных и палеомагнитных свойств магматических образований средней юры имеет столетнюю историю. Большой вклад в изучение этих вопросов внесли ученые-палеомагнитологи Печерский Д.М., Диденко А.Н., Сафонов В.А., Ямпольская О.Б., Мейерс М. и др. В последнее десятилетие под руководством профессора Веселовского Р.В. (2013) палеомагнитные исследования пород бодракской свиты J_{2bd} были продолжены в большом объеме и получены интересные результаты по проявлению в интрузивных образованиях прямой и обратной полярности намагничения горных пород.

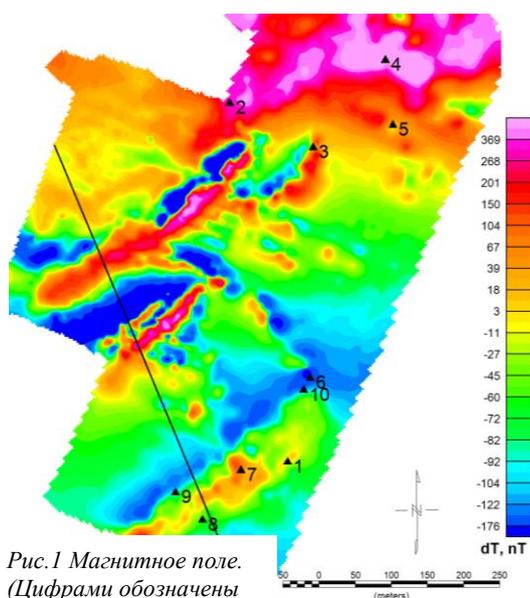


Рис.1 Магнитное поле.
(Цифрами обозначены
номера обнажений)

В 2019 году сотрудниками кафедры геофизики геологического факультета МГУ были выполнены площадные магнитные съемки (рис 1), которые позволили составить схему геолого-тектонического районирования территории распространения магматических образований средней юры. А в 2020 году было проведено изучение магнитных и палеомагнитных свойств для обнажений вулканических и субвулканических образований бодракской свиты, выходящих на поверхность в правом борту р. Бодрак у с. Трудолюбовка. Из 10 обнажений было отобрано 140 ориентированных в пространстве образцов интрузивных пород. Палеомагнитные исследования проводились в лаборатории Главного геомагнитного поля и Петромагнетизма ИФЗ РАН.

В лабораторных условиях для всей коллекции образцов были определены значения магнитной восприимчивости с помощью каппометра AJICO Kappabridge MFK1-FA и значения векторов естественной остаточной намагниченности (ЕОН) с помощью Криогенного магнитометра 2G Enterprises SQUID.

Полученные значения магнитной восприимчивости χ для интрузивных пород из изученных обнажений показывают, что χ образцов коллекции варьирует в широком диапазоне от $10 \cdot 10^{-5}$ до $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. По значениям магнитной восприимчивости выделено две контрастные группы обнажений: магнитная северная группа обнажений (№2,3,4,5) ср средним

значением $\approx 800 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и слабомагнитная южная - №1,8,9,10, со средним значением $\approx 25 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Выполненный анализ результатов определения естественной остаточной намагниченности (ЕОН) интрузивных пород показал высокую корреляцию значений остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости по выделенным группам обнажений и предположить, что преимущественно носителями намагниченности являются ферромагнетики (магнетит или титаномагнетит). По стереорамам был проведен анализ направлений вектора ЕОН, который показал, что: а) интрузии на обнажениях 1 и 9 имеют обратную намагниченность; б) интрузии на обнажения 2, 4, 5, 6 – преимущественно прямую (близкую к современной $I=62^0$); в) в обнажениях 3 и 7 выявлены близэкваториальные значения наклона I , что свидетельствует о вкладе нескольких компонент намагниченности; г) в обнажения 8 и 10 значения разделены на антиподальные группы. Отдельно изучался вопрос анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) на коллекции из 85 образцов. Степень анизотропии образцов не превышает 3%. Эти данные не позволили высказать предположение о реконструкции направлений движения магматического расплава и структурного положения магматических тел.

Был изучен вопрос скорости изменения магнитного момента насыщения образцов от их температуры. Анализ показал, что преимущественно носителями намагниченности являются ферромагнетики - низкотитанистый титаномагнетит (точка Кюри лежит в пределах $510-580^{\circ}$ С), а в телах 1, 9, 10 отмечаются преимущественно парамагнитные минералы, с подчиненным содержанием ферромагнитных (низкотитанистым титаномагнетитом - биотит и амфиболы, пироксены). С помощью диаграммы Дзя-Данлопа определено доменное состояние минералов, и сделан вывод, что ферромагнитные минералы изученных тел находятся в PSD (псевдооднодоменной) области, что соответствует размерам частиц более 10-50 нм.

Статистический анализ полученных параметров индуцированной и остаточной намагниченностей позволит авторам в будущем перейти к новому этапу магнитного моделирования интрузивных образований бодракской свиты в изученном районе и сформировать предполагаемую трехмерную модель формирования магматического комплекса средней юры юго-восточной части Качинского антиклинория, опирающейся на геологическую гипотезу, опубликованную профессором Никишиным А.М (2006).

Литература

1. Корнейко А.А., Веселовский Р.В. Новые данные о палеомагнетизме среднеюрского магматического комплекса долины р. Бодрак (Горный Крым) // Вестник Московского университета. Серия 4 Геология. №4. 2013. Стр 10-17.

2. А.М. Никишин и др. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма. Издательство московского университета. 2006. 59 стр.