

На правах рукописи



Орехова Дарья Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР ЛИТОСФЕРЫ В ВЫСОКИХ
ШИРОТАХ ПО ДАННЫМ ЕСТЕСТВЕННЫХ И МОЩНЫХ
ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поиска
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук

Научный руководитель: **Коротаев Сергей Маратович,**
доктор физико-математических наук,
Центр геоэлектромагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ЦГЭМИ ИФЗ РАН),
заведующий лабораторией морских электромагнитных исследований

Официальные оппоненты **Лукин Дмитрий Сергеевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»,
заведующий кафедрой волновых процессов и систем управления

Пушкарев Павел Юрьевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
доцент кафедры геофизики геологического факультета

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 04 февраля 2016 г. в 14 час.00 мин. на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданного на базе Федерального государственного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр.1., 3-й этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института <http://www.ifz.ru/>. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru> и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1., ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Электромагнитное зондирование литосферы в высоких широтах, выполняемое как для решения задач фундаментальной геологии и геофизики, так и для поиска полезных ископаемых, осложняется тем, что проводится вблизи сложного и динамичного ионосферного источника поля – ионосферных токовых систем. Амплитуды магнитотеллурического поля в этой области достаточно велики, чтобы создать серьезный уровень помех, затрудняющий реализацию методов искусственного поля. С другой стороны, для описания такого магнитотеллурического поля не подходит общепринятое приближение плоской волны, что затрудняет реализацию обычных методов естественного поля. Можно предложить два пути преодоления этих трудностей: использование особо мощных искусственных источников или же использование иного подхода к естественному полю – отказ от приближения плоской волны в пользу концепции источников, эквивалентных реальным.

В последнее время возможности электромагнитных исследований значительно расширились благодаря развитию технических средств зондирования с мощными крайне-низкочастотными (КНЧ) источниками первичного поля. В настоящей работе рассматривается использование антенны сверхдлинноволновой радиостанции, расположенной в средней части Кольского полуострова. Такой протяженный стационарный источник позволяет проводить зондирования земной коры в различных районах полуострова на большой площади и изучать крупномасштабные аномалии электропроводности. Возможности использования мощного морского передвижного искусственного источника рассматриваются на модельной задаче поиска месторождений углеводородов на шельфе Баренцева моря.

Однако даже мощные искусственные источники, тем более в океане, пригодны для изучения только верхних слоев земной коры. Для решения задач фундаментальной геофизики применение естественных источников, обеспечивающих за счет своего масштаба наибольшую глубинность, не имеет альтернативы. Особенно актуально такое глубинное электромагнитное зондирование на акватории Северного Ледовитого океана, где при типично океанических глубинах (до 4 км) обнаружены признаки литосферы, по своему строению близкой к континентальной. Первые доказательства этому были получены именно магнитотеллурическими методами, а затем

подтверждены другими методами геофизики. Однако представления о границах области распространения континентального типа литосферы до сих пор остаются противоречивыми. Сыгравшие столь важную роль пионерские магнитотеллурические зондирования (МТЗ) Северного Ледовитого океана были выполнены с поверхности льда в 1960–70-х годах по очень редкой сети наблюдений, интерпретированы в рамках простейших одномерных моделей и с тех пор не повторялись. В настоящее время, с одной стороны, развита техника глубоководных донных измерений, позволяющая резко повысить возможности зондирования за счет снятия экранирующего эффекта водной толщи, а с другой – развиты методы трехмерной интерпретации, резко увеличивающие ее достоверность. За годы дрейфа станций “Северный полюс” был накоплен большой объем магнитовариационных данных, достаточный для применения метода магнитовариационного профилирования. Но нарушение условия плоской волны делает невозможным традиционное применение этого метода без учета структуры источников. Предлагаемая в работе концепция эквивалентных источников естественного поля позволяет учесть такой сложный источник вариаций как полярный электроджет и, таким образом, произвести картирование области Северного Ледовитого океана регионального масштаба.

Цель работы. Цель работы заключалась в исследовании структур литосферы Кольского полуострова и шельфа Баренцева моря по данным мощных искусственных источников, моделировании электромагнитных зондирований Северного Ледовитого океана и картировании литосферных структур приполюсной части этого океана по магнитовариационным данным дрейфующих станций “Северный полюс”.

В рамках диссертационной работы решены следующие основные задачи:

1. Моделирование крупных геоэлектрических структур в средней части Кольского полуострова по данным магнитных измерений, а также в районе Кольского залива по данным шестикомпонентных электромагнитных измерений сигналов мощного стационарного источника и интерпретация результатов.

2. Построение алгоритма определения наличия/отсутствия залежей углеводородов в перспективных геологических структурах шельфа с применением низкочастотного электрического биполя.

3. Моделирование возможностей магнитотеллурических зондирований и зондирований с помощью искусственных источников для обоснования стратегии будущих экспериментальных работ на акватории Северного Ледовитого океана.

4. Построение алгоритма нахождения эквивалентных источников магнитотеллурического поля в Северном Ледовитом океане и моделирование геоэлектрического разреза земной коры в приполюсной части этого океана с учетом найденных таким образом источников по магнитовариационным данным дрейфующих станций “Северный полюс”.

Научная новизна. Получены новые данные о разломной тектонике и крупных проводящих аномалиях средней части Кольского полуострова и в районе Кольского залива. Описан береговой эффект, вызванный циркуляцией тока по региональным разломам полуострова с замыканием через море. Построен оригинальный алгоритм нахождения эквивалентных источников магнитотеллурического поля в высоких широтах. Создана трёхмерная модель геоэлектрического разреза приполюсной части Северного Ледовитого океана на площади регионального масштаба.

Практическая значимость полученных результатов. Полученные трехмерные модели средней части Кольского полуострова и Кольского залива позволили получить информацию о разломной тектонике данного района и сделать некоторые выводы о блоковом строении и постгляциальном подъеме земной коры. Найдена оптимальная схема зондирующей установки для нахождения залежей углеводородов в перспективных геологических структурах арктического шельфа с помощью мощного низкочастотного электрического биполя. Разработанная методика нахождения эквивалентного источника позволяет учесть сложный источник вариаций магнитного поля при проведении магнитовариационных зондирований в высоких широтах. В дальнейшем эта методика может послужить основой для нового масштабного эксперимента на всей площади акватории Северного Ледовитого океана и построения его трехмерной модели.

Основные защищаемые положения:

1. Моделирование результатов проведенных на Кольском полуострове экспериментов по электромагнитному зондированию с мощным протяженным стационарным источником поля позволило получить новую информацию о разломной тектонике средней части Кольского полуострова и

определить разницу в сопротивлении высокоомных блоков земной коры в районе Кольского залива.

2. Моделирование различных систем наблюдения над моделью месторождения углеводородов на шельфе позволило выделить оптимальные параметры зондирующей установки для диагностирования наличия/отсутствия залежей в перспективных морских геологических структурах при использовании низкочастотного электрического биполя. Показано, что наибольшую чувствительность к содержащим углеводороды структурам имеет вертикальная электрическая компонента поля.

3. Магнитотеллурические зондирования в Северном Ледовитом океане позволяют уверенно различать океанический и континентальный тип литосферы по измерениям МТ полей как на поверхности океана, так и на дне, однако для картирования структур пригодны только донные измерения.

4. Приближение плоской волны при реализации магнитовариационного профилирования в высоких широтах неприменимо. Предложенный алгоритм нахождения по магнитовариационным данным эквивалентного источника позволяет учесть сложный источник вариаций первичного поля при моделировании геоэлектрического разреза в арктическом районе. Полученная по такой методике модель разреза приполюсной части Северного Ледовитого океана согласуется с общепринятыми взглядами на строение литосферы в хорошо изученной части региона, а также позволяет сделать выбор между конкурирующими гипотезами в тех областях океана, генезис которых до сих пор остается дискуссионным.

Фактический материал и методы исследования. В работе использованы результаты экспериментальных измерений электромагнитного поля на Кольском полуострове, выполненных в 2009 и 2011 году экспедициями Полярного геофизического института РАН; а также низкочастотные магнитовариационные данные, полученные экспедициями Арктического и Антарктического института на дрейфующих станциях Северный полюс с 1962 по 1976 год.

Численное моделирование электромагнитных полей проводилось методом интегральных уравнений с использованием программного обеспечения Pie3d (Parallel Electromagnetic Forward Modeling Based on the Method of Integral Equations), разработанного Консорциумом по электромагнитному моделированию и инверсии (CEMI, Юта, США). Расчеты

проводились на высокопроизводительных кластерах НИЦ “Курчатовский институт”, МГУ и РАН.

Личный вклад. Построение первоначальных геоэлектрических моделей по априорным геолого-геофизическим данным, процесс трехмерного моделирования, поэтапная оптимизация получаемых моделей и анализ результатов выполнялись лично автором. Обработка данных экспериментов, нейросетевая инверсия и геолого-геофизическая интерпретация полученных моделей проводились при непосредственном участии автора в коллективе соавторов.

Степень достоверности полученных результатов определяется качеством исходных данных и достаточно высока. Компоненты электромагнитного поля при исследованиях на Кольском полуострове и в Кольском заливе Баренцева моря были измерены с высокой точностью, хотя из-за сложных экспедиционных условий лишь по единичным профилям. На достоверность полученной трехмерной региональной модели центральной части Северного Ледовитого океана оказывает влияние неравномерность распределения имеющихся в наличии магнитовариационных данных, полученных на дрейфующих станциях. Тем не менее, модель не противоречит современным геологическим представлениям и может стать основой для дальнейшего масштабного эксперимента.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научных конференциях: V Всероссийской конференция “Необратимые процессы в природе и технике”, Москва, 2009; I международная конференция “Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем”, Киев, 2009; Workshop in memory of M. N. Berdichevsky and P. Weidelt, Москва-Звенигород, 2010; II Международная Нобелевская конференция “Инновационные электромагнитные методы геофизики”, Салехард, 2010; AGU Fall Meeting, San-Francisco, 2010, 2014; V Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли, Санкт-Петербург, 2011; AGU Fall Meeting, San-Francisco, 2012; II Международная конференция “Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем”, Киев, 2012; VI Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, Новосибирск, 2013; 22-й семинар по электромагнитным зондированиям, Веймар, 2014.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 129 страниц, включая 61 рисунок и 4 таблицы. Список литературы содержит 77 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. С. М. Коротаеву.

Автор благодарит д.ф.-м.н. Ю.Г. Щорса, к.ф.-м.н. М.С. Круглякова, к.ф.-м.н. В.С. Шнеера, к.ф.-м.н. И.Л. Трофимова к.ф.-м.н. И.В. Попову, за постоянную поддержку и плодотворное обсуждение всех аспектов работы, д.ф.-м.н. Е.Д. Терещенко и В.Ф. Григорьева за поставленные ими крупные эксперименты с мощным источником, д.ф.-м.н. профессора М.С. Жданова за предоставленное программное обеспечение трехмерного моделирования, д.ф.-м.н. профессора В.И. Дмитриева, к.ф.м.н. Варенцова и д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинова, внимание и мнение которых сыграло важную роль в процессе работы.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, научные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об использованном фактическом материале, методах исследования и апробации работы.

Глава 1 посвящена проблеме электромагнитных зондирований в высоких широтах. Эти методы имеют серьезные ограничения, связанные с близостью района наблюдений к источнику поля – токовым ионосферным системам. Приводится обзор работ, связанных с изучением влияния неоднородностей первичного поля при электромагнитных исследованиях с естественным источником поля. В **разделе 1.1** приводится обзор магнитотеллурических зондирований и зондирований с искусственными источниками первичного поля, проведенных на Кольском полуострове. В **разделе 1.2** приводится обзор магнитотеллурических зондирований в Северном Ледовитом океане.

Глава 2 посвящена анализу результатов двух экспериментов, проведенных на Кольском полуострове экспедициями Полярного Геофизического института РАН с помощью мощного протяженного стационарного источника электромагнитного поля. Первый эксперимент представлял собой наземные измерения магнитного поля на удаленном параллельном источнику профиле. По этим измерениям в данной работе было проведено моделирование крупных геоэлектрических структур северо-западной части полуострова. С учетом полученной модели далее анализировались результаты второго эксперимента, в ходе которого были проведены уже донные измерения электромагнитного поля в Кольском заливе Баренцева моря. Этот эксперимент интересен, прежде всего, тем, что в ходе него испытывались первые отечественные донные шестикомпонентные электромагнитные станции. Во-вторых, измерялись все компоненты поля, включая вертикальную электрическую, что редко происходит в морской электроразведке. И в-третьих, использовался мощный удаленный стационарный источник, расположенный на суше, что также пока чуждо для морских исследований.

В разделе **2.1** описываются основные математические инструменты, использованные для моделирования. Они являются общими для всех последующих глав диссертации.

Для расчета электромагнитных полей использовался метод интегральных уравнений, решаемых методом коллокаций. Для решения получаемой системы линейных уравнений использовался обобщенный итерационный метод минимальных невязок.

Моделирование геоэлектрических сред проводилось путем подбора параметров моделей и сопоставления соответствующих им полей с имеющимися экспериментальными данными. Однако на определенном этапе удавалось выделить некоторый конечный небольшой набор параметров модели, в отношении которых уже решалась полноценная обратная задача, для чего в сотрудничестве с И.В. Поповой применялся нейросетевой метод, основанный на алгоритме обратного распространения ошибки (МОРО) Использовалась трехслойная нейронная сеть.

Раздел 2.2 посвящен процессу интерпретации результатов эксперимента в северо-западной части Кольского полуострова, проведенного в апреле 2009 г. Профиль наблюдений располагался в западной части

Мурманского блока, где на поверхность выходят породы древнего протофундамента, обладающие высоким сопротивлением 10^4 – 10^5 Ом·м.

Три компоненты магнитного поля измерялись в 8 точках вдоль автодороги Мурманск-Туманный в диапазоне частот от 0.01 Гц до 40 Гц. В качестве источника первичного поля использовалась антенна СНЧ-радиостанции “Зевс” длиной около 60 км.

Подбор нормального разреза – горизонтально-однородной слоистой среды – осуществлялся на основании известных геофизических результатов предшествующих региональных геоэлектрических исследований, а также путем согласования расчетного первичного поля биполя, соответствующего антенне передатчика, с результатами эксперимента. В итоге были выбраны следующие параметры: верхний слой проводимостью 10^{-4} См/м и мощностью 2000 м подстилается основанием проводимостью 10^{-5} См/м.

Основной особенностью экспериментальных данных оказалось превышение на порядок значений амплитуд вертикальной магнитной компоненты поля над горизонтальными, которое наблюдалось во всем диапазоне частот. Такое соотношение компонент удалось количественно объяснить циркуляцией тока по региональным разломам с замыканием тока через море. Причем в модели оказалось достаточно учитывать сравнительно небольшую прибрежную зону моря шириной порядка 20 км и глубиной 200–400 м. Таким образом, экспериментальные данные указывают на значительный береговой эффект. Однако уровень амплитуды горизонтальной компоненты поля H_x при этом стал существенно превосходить экспериментальный. Уменьшить амплитуду H_x , сохранив при этом уровень вертикальной компоненты, удалось путем добавления в модель крупного локального проводящего тела. Задача нахождения оптимальных геометрических параметров такого объекта была решена с помощью нейросетевого моделирования в сотрудничестве с Поповой И.В.

Поиск решения проводился в рамках класса моделей, представляющих собой коровый проводник трапециевидной формы в вертикальном сечении и проводимостью 1 См/м с четырьмя характерными параметрами: глубинами и протяженностями верхней и нижней границы в направлении север-юг.

Далее приведены результаты моделирования и их геологическая интерпретация. Полученная итоговая модель в плане представлена на рис. 1. Получены данные о разломной тектонике северо-западной части

полуострова. Обнаруженная удаленная от профиля наблюдений проводящая аномалия расположена в восточной части Кольско-Норвежского блока и интерпретируется как выклинивающийся к северу коровый проводник, сложенный графитизированными породами.

Раздел 2.3 посвящен анализу результатов эксперимента, проведенного сотрудниками ПГИ РАН с помощью того же мощного стационарного источника первичного поля в Кольском заливе Баренцева моря в сентябре 2011 г. Залив располагается в северо-западной части Кольского полуострова, в области распространения малопроводящих архейских пород. Он имеет сложную структуру, обусловленную системой разломов, ледниковой эрозией и неравномерным постледниковым подъемом. Согласно известным геофизическим данным удельное сопротивление в этом районе может достигать 10^5 Ом·м.

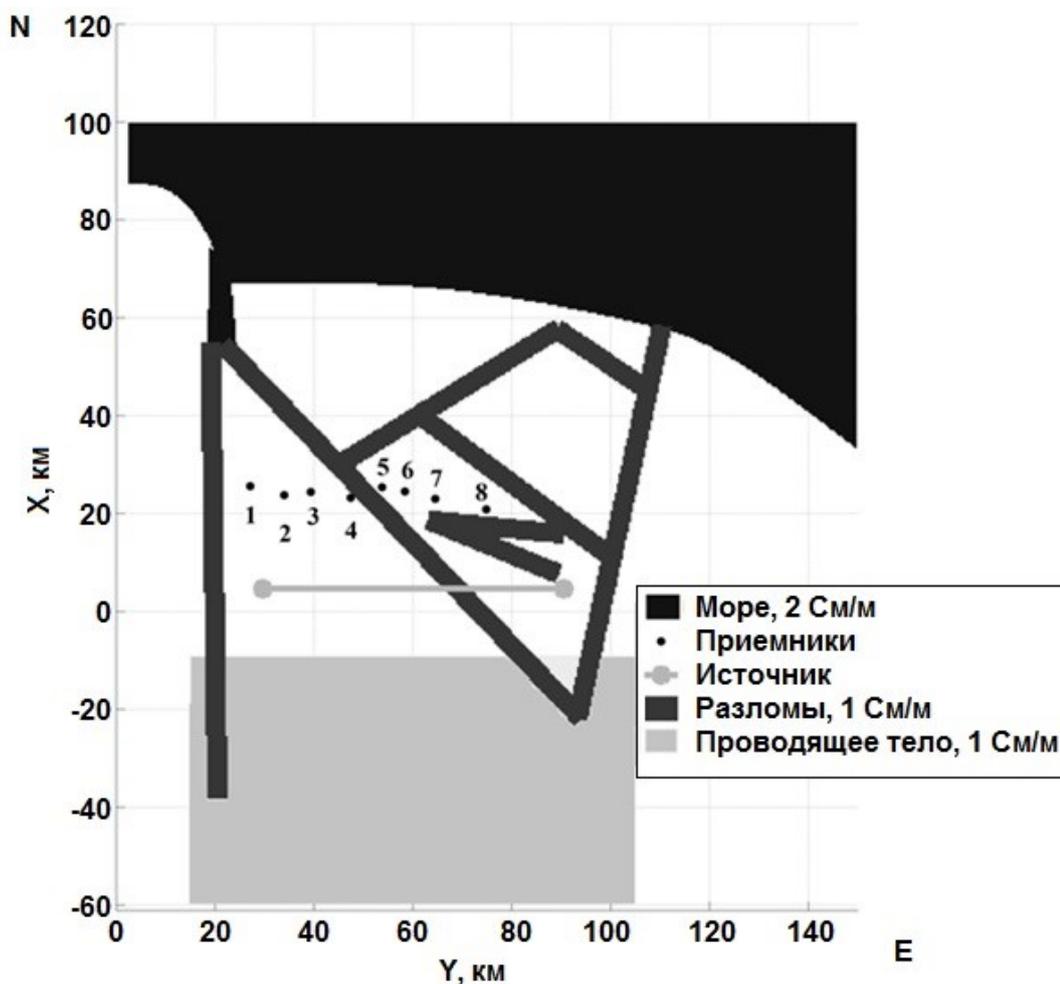


Рис. 1. Средняя часть Кольского полуострова. Итоговая модель в плане (сечение по горизонту 2 км).

В ходе эксперимента были измерены все шесть компонент электромагнитного поля в шести точках профиля, пересекающего залив, на глубинах от 36 до 85 м на частотах 41, 62, 82 и 144 Гц. Специальные измерения проводимости воды по всему сечению залива показали, что она однородна и равна 3.2 См/м.

Расчеты показали, что моделируемые поля высокочувствительны к геометрии дна залива. Это потребовало детального учета батиметрии, что привело к необходимости использования небольших ячеек: 20 м по горизонтальным направлениям и 5 м по вертикали.

В первоначальной геоэлектрической модели нормальный разрез был принят двуслойным малопроводящим, таким же, как и в предыдущей разделе. На первом этапе было рассчитано более пятидесяти моделей, в которых варьировались параметры нормального разреза, проводимость и местоположения разломов, геометрия и толщина осадочного пояса, обрамляющего залив. Эти вычислительные эксперименты показали, что моделируемые компоненты поля сложным образом зависят от параметров нормального разреза и от проводимостей ближайших к профилю пяти разломов. Кроме того, было обнаружена принципиальная возможность различения высоких сопротивлений в диапазоне 10^3 – 10^5 Ом·м. Для решения обратной задачи определения оптимальных параметров разреза и проводимости ближайших к профилю измерений пяти разломов был использован нейросетевой метод. Однако найденное приближение нельзя было считать удовлетворительным.

Согласно результатам сейсмических исследований, средняя скорость продольных сейсмических волн к западу от залива много меньше, чем к востоку. Это может указывать на большую раздробленность (трещиноватость) первого блока. Исходя из этого, были проведены вычисления для моделей, в которых верхняя часть разреза по двум сторонам от залива имеет разное удельное сопротивление, а на границе между этими блоками вдоль залива был добавлен разлом. Эти вычисления показали, что вертикальная магнитная и все электрические компоненты поля оказались чувствительны к положению разлома и сопротивлениям кристаллических блоков. Обратную задачу удалось решить по электрическим компонентам для двух параметров – сопротивлений двух блоков.

Далее представлены результаты моделирования и их геологическая интерпретация. Полученная итоговая модель в плане показана на рис. 2. Вдоль Кольского залива проходит раздел между блоками земной коры, имеющими разную проводимость, хотя сложены они сходными геологическими породами. Проводимость различных разломов, пересекающих Кольский залив и сопряженных с ним, оказалась различной, что может быть связано с временной дифференциацией тектонической активности. Осадочный пояс, окружающий Кольский залив, оказался асимметричным, в соответствии с нормальным правым смещением русла древней реки.

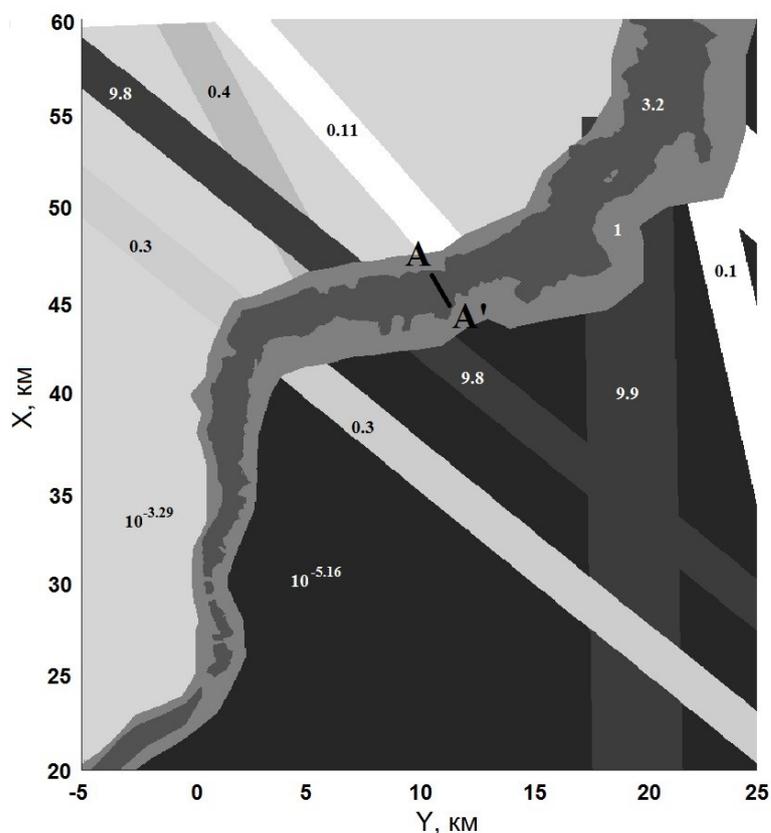


Рис.2. Кольский залив. Итоговая модель в плане. Цифрами и тонами обозначена удельная проводимость.

В главе 3 рассматриваются возможности использования передвижных мощных искусственных источников первичного поля для задач прямого поиска месторождений углеводородов на шельфе. Приведен краткий обзор применяемых в современной практике технологий поиска месторождений на акваториях. Рассматриваются возможности использования передвижного искусственного источника низкочастотного поля (электрического биполя).

Используется пример хорошо изученного Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) в Баренцевом море.

Рассчитывались все компоненты электромагнитного поля на дне моря по площади над месторождением при различных способах возбуждения на 20 частотах в диапазоне 0.01–10 Гц в двух случаях: присутствия и отсутствия углеводородов в коллекторе.

В разделе 3.1 приводится геологическая характеристика Штокмановского месторождения. Четыре продуктивных горизонта расположены в верхе- и среднеюрских песчаниках.

Раздел 3.2 посвящен построению геоэлектрической модели месторождения. Моделирование проводилось для двух наиболее крупных залежей Ю₀ и Ю₁. Для оценки электрических параметров модели использовались справочные данные и известные эмпирические формулы.

Раздел 3.3 содержит результаты моделирования электромагнитного поля над месторождением и их анализ. Рассматривается источник – биполь длиной 2 км, ориентированный по следующим вариантам: по оси y – тангенциальная поляризация; по оси x – радиальная поляризация; по оси z от поверхности моря до дна длиной 320 м – вертикальная поляризация. Источник помещается на двух расстояниях (1 и 6 км) от края границы верхней залежи Ю₀. Анализ результатов, проведенный в полных полях, показал, что, в целом, каждая из возможных поляризаций источника (кроме вертикальной), каждая из измеряемых компонент (кроме вертикальной магнитной) имеет в своих сочетаниях особую эффективность. Но наиболее эффективным является радиальное расположение источника и измерение вертикальной электрической компоненты поля. Действительно, горизонтальный биполь генерирует в среде поля как индукционного (ТЕ-мода), так и гальванического (ТМ-мода) происхождения, причем на низких частотах гальванический отклик от узкого тонкого плохопроводящего тела пласта доминирует. На верхней и нижней поверхностях углеводородной залежи образуется заряд и генерируется вертикальное электрическое поле.

Рассмотрен вариант буксирования такого радиального источника над залежью. Особенности амплитудных и фазовых аномалий продольной источнику компоненты электрического поля позволяют обнаружить границы залежи по линии буксировки источника.

Глава 4 посвящена перспективам магнитотеллурических зондирований в Северном Ледовитом океане.

Северный Ледовитый океан имеет необычное отличающее его геологическое строение. При типично океанических глубинах здесь обнаруживаются структуры, имеющие различное геологическое происхождение, в том числе не свойственное другим океанам. Ряд магнитотеллурических зондирований (МТЗ) был выполнен в центральной части океана еще в 1960–970-х годах, и их результаты до сих пор уникальны. Именно они впервые указали на неожиданное присутствие в этом океане блоков литосферы континентального типа, хотя ввиду крайне редкой сети наблюдений границы блоков остались неопределенными. При проведении МТЗ непосредственно определяется тип литосферы по глубине залегания высокопроводящего основания, подстилающего литосферу. Для континентального типа литосферы это примерно 400 км, для океанического – 50 км. В свою очередь, тип литосферы определяет тип собственно коры.

В разделе 4.1 рассматриваются трехмерные модели типа горст/грабен под дном океана с двумя типовыми нормальными разрезами, соответствующими случаям континентальной и океанической литосферы под океаном глубиной 4 км и проводимостью 3,6 См/м. Кроме глубины залегания проводящего основания они отличаются характерной проводимостью литосферы: 10^{-3} См/м для континентального типа и 10^{-2} для океанического. Типовые неоднородности фундамента горст/грабен имели длину 60 км, ширину 20 км и перекрывались слоем осадков мощностью 1 км и проводимостью 1 См/м.

В целом, сравнение модельных кривых МТЗ для неоднородностей горст/грабен показало, что донные зондирования с высокой точностью соответствуют расчетной трехмерной геоэлектрической модели, как при континентальном, так и при океаническом типах литосферы. Модельные кривые зондирований со льда отличаются от донных кривых меньшей разрешающей способностью. Восходящая ветвь смещена в область больших периодов, а сопротивление максимума на порядок ниже, чем при донном зондировании. Пригодная для интерпретации нисходящая ветвь при зондировании со льда наблюдается только в случае океанической литосферы.

В разделе 4.2 рассматриваются возможности зондирований с помощью источников искусственного возбуждения на тех же типовых структурах.

Моделировался источник, представляющий собой электрический биполь длиной 2 км, располагаемый на дне перпендикулярно продольной оси неоднородности (поперечная поляризация), параллельно ей (продольная поляризация) и длиной 4 км вертикально от поверхности до дна (вертикальная поляризация). Расчеты проводились над структурой на частотах 0.01, 0.1 и 1 Гц. На более высоких частотах сигнал становится заведомо ниже установленного типовой современной аппаратурой порога (10 нВ/м, 10 пТл) при токе в источнике 100 А (имея в виду легкий источник, который может быть доставлен авиацией для работы со льда). В результате обнаружилось, что практически во всех случаях поля вне непосредственной близости источника оказались ниже порога чувствительности. Исключение составили только горизонтальная поперечная магнитная компонента при продольной поляризации и горизонтальная продольная магнитная при поперечной поляризации на частоте 0.01 Гц. Однако именно эти компоненты наименее чувствительны к структурам разреза. Остальные компоненты в той или иной степени реагируют на структуры, но затухают на расстоянии порядка километра. Наиболее эффективной могла бы быть вертикальная компонента электрического поля при поперечной поляризации. Структура прекрасно выделяется в полном поле, особенно по фазе. Однако для реализации преимуществ искусственного источника необходимо, чтобы он давал ток не менее 10 кА на частотах порядка 0.01 Гц и при этом был достаточно легким для доставки на лед.

В разделе 4.3 рассматриваются результаты модельных расчетов электрического сопротивления на реальных структурах дна Северного Ледовитого океана: подводных хребтах Гаккеля и Альфа – Менделеева. В случае хребта Гаккеля было рассчитано три модели с типично океаническим нормальным разрезом и изменяющейся от модели к модели аномалией. Для хребта Менделеева-Альфа была рассмотрена одна модель с типично континентальным нормальным разрезом. Сделан вывод, что, несмотря на значительно более низкую разрешающую способность проведения МТЗ с поверхности льда, тип литосферы (и соответствующий ему тип коры) все же надежно определяется. Значительные искажения кривых над крупными геологическими структурами, которые наблюдаются при измерениях на дне, сглаживаются, что делает решение задачи картирования типов литосферы в

некотором смысле даже более удобным. Но для картирования коровых структур необходим донный вариант исследований.

Глава 5 посвящена возможностям использования естественного поля для картирования геологических структур Северного Ледовитого океана (СЛО). Из-за близости ионосферных источников первичное поле на этой акватории заведомо далеко от приближения плоской волны. За годы дрейфа научных станций “Северный полюс” на них был накоплен большой объем несинхронных записей вариаций магнитного поля Земли. И.Л. Трофимовым были предложены четырехкомпонентные комплексные магнитные индукционные вектора (МИВ), позволяющие работать с асинхронными данными при любых источниках. В данной главе рассматривается интерпретация этих векторов, полученных Трофимовым в результате обработки данных станций “Северный Полюс” за период с 1962 по 1976 год. Целью интерпретации являлось построение трехмерной модели геоэлектрического разреза центральной части СЛО. Проводилась интерпретация МИВ на суточном периоде 24 часа, на котором регулярные вариации имеют наибольшую амплитуду и поэтому выделялись с высокой точностью из временных рядов. Остальные гармоники не использовались, поскольку наиболее остро стояла именно проблема определения источника. Для учета влияния геометрии ионосферной токовой системы разработан метод определения параметров эквивалентного источника вариаций, физическая суть которого заключается в существенно разной чувствительности различных компонент комплексных МИВ к геометрии источника поля и горизонтальным неоднородностям разреза, а решение обратной задачи основано на теории нейронных сетей. После решения этой задачи параметры геоэлектрического разреза определялись методом подбора на основе расчетных моделей, включавших в себя найденные эквивалентные ионосферные источники вариаций.

В разделе 5.1 в краткой форме представлено изложение особенностей расчета МИВ. Коэффициенты в уравнении линейной связи можно выразить через четыре величины (a , b , α , φ), являющиеся параметрами эллипса поляризации (a — большая полуось, b — малая полуось, α — угол a с осью x , φ — фаза). Эта четверка рассматривается как комплексный вектор МИВ.

В разделе 5.2 описана методика проведенного моделирования. Область моделирования в горизонтальной плоскости состояла из трёх частей: 1)

область интерпретации – приполюсная часть СЛО, для которой проводился подбор параметров геоэлектрической модели; 2) переходная область с приближенным продолжением геологических структур; 3) горизонтально-слоистый океанический разрез. Для каждой модели проводился расчет двух поляризаций магнитного поля, по которым вычислялось распределение параметров МИВ на сети 9×9 ячеек, охватывающей область интерпретации. Основное внимание уделялось распределениям двух параметров МИВ наиболее точно определяемых из эксперимента: большой и малой полуосей.

В разделе 5.3 описано решение задачи нахождения эквивалентных источников первичного поля по экспериментальным данным.

Расчеты показали, что лишь в случае близкого источника, создающего неоднородное первичное поле, можно достичь величин больших полуосей по порядку близких к наблюдаемым на акватории СЛО. При этом при всех манипуляциях с источником величины малых полуосей меняются значительно меньше больших. Моделирование полей двух вертикальных магнитных диполей над горизонтально-слоистым разрезом показало, что имеется такая область (область постоянной фазы), в которой малая полуось на несколько порядков меньше большой полуоси. Если поместить в эту область неоднородность, то увеличение малой полуоси можно целиком объяснить наличием неоднородности. Таким образом, величина больших полуосей зависит в основном от геометрии источника, а малых – от геоэлектрического разреза. В связи с этим, для численного моделирования на площади конечного размера предложена концепция нахождения эквивалентного источника первичного поля по распределению больших полуосей. Следует подчеркнуть, что речь идет о нахождении не реальных, а именно эквивалентных упрощенных источников, обеспечивающих ту же осредненную во времени структуру переменного магнитного поля на ограниченной акватории, что и реальные источники.

В качестве модели источника были выбраны два вертикальных магнитных диполя, находящиеся на высоте 100 км. Задача определения их оптимального расположения относительно области интерпретации была решена с помощью нейросетевого метода. Были получены следующие географические координаты оптимальных диполей: $\varphi_1=69.6^\circ$ с.ш., $\lambda_1=37^\circ$ з.д.; $\varphi_2=65.6^\circ$ с.ш., $\lambda_2=83^\circ$ в.д. Найденные модельные источники использовались далее при подборе глубинной части разреза.

В разделе 5.4 описано моделирование геоэлектрического разреза приполюсной части СЛО. По результатам расчетов с найденным источником для ряда простых локальных неоднородностей проводимости было выделено три вида элементарных аномалий, которые в дальнейшем использовались как элементы для построения региональной модели электропроводности в области интерпретации: 1) вертикальный проводящий разлом, соединяющий осадочных чехол с проводящим основанием; 2) зона подъема проводящего основания, границы которой могут быть как вертикальными, так и наклонными; 3) зона развития континентальной литосферы с характерной проводимостью 10^{-3} См/м, которая может отделяться от океанической переходной зоной, где проводимость коры и верхней мантии плавно меняется от 10^{-3} до 10^{-2} См/м. Было рассчитано несколько десятков региональных моделей, состоящих из таких элементарных аномалий и выбрана оптимальная модель. Эта итоговая модель представлена в трех разрезах на рис.3–5.

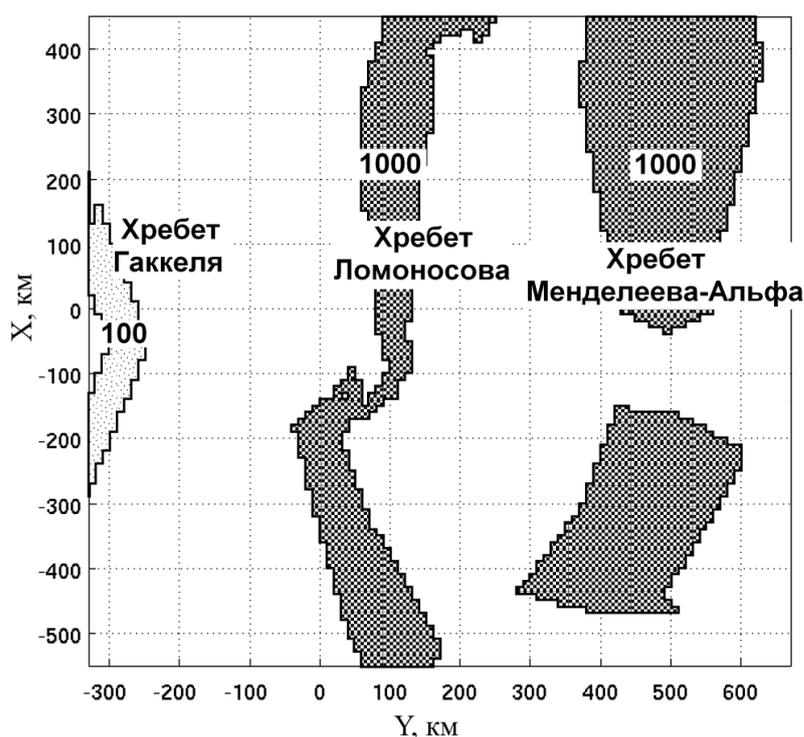


Рис. 3. Итоговая модель центральной части СЛО в плане. Разрез проходит через основные геологические структуры океана на глубине 4 км. Цифрами даны удельные сопротивления структур, Ом·м

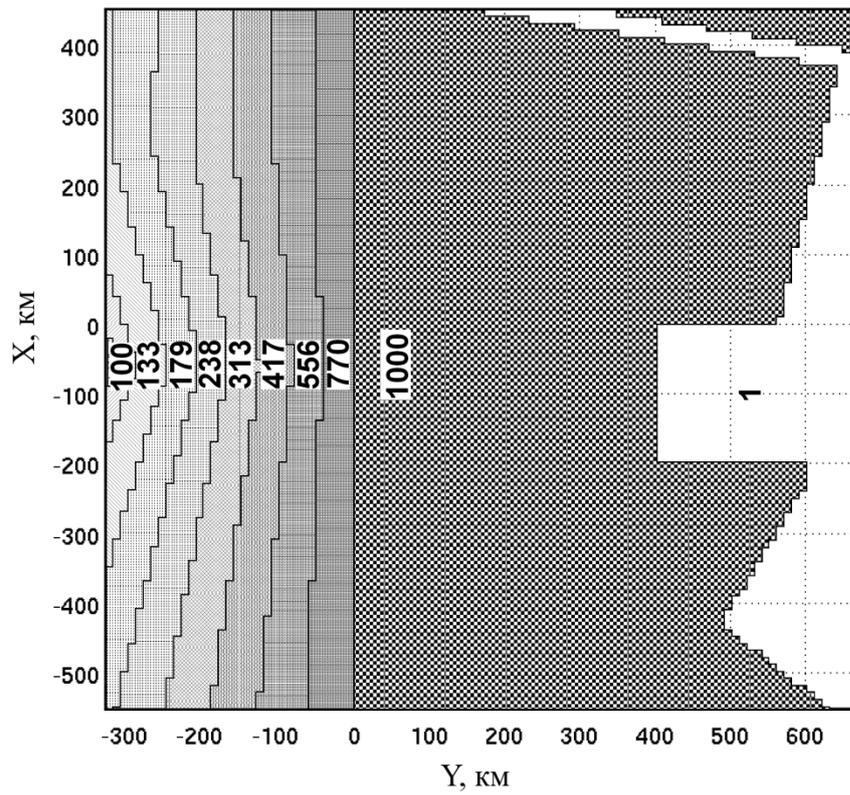


Рис. 4. Горизонтальное сечение итоговой модели на глубине 60 км

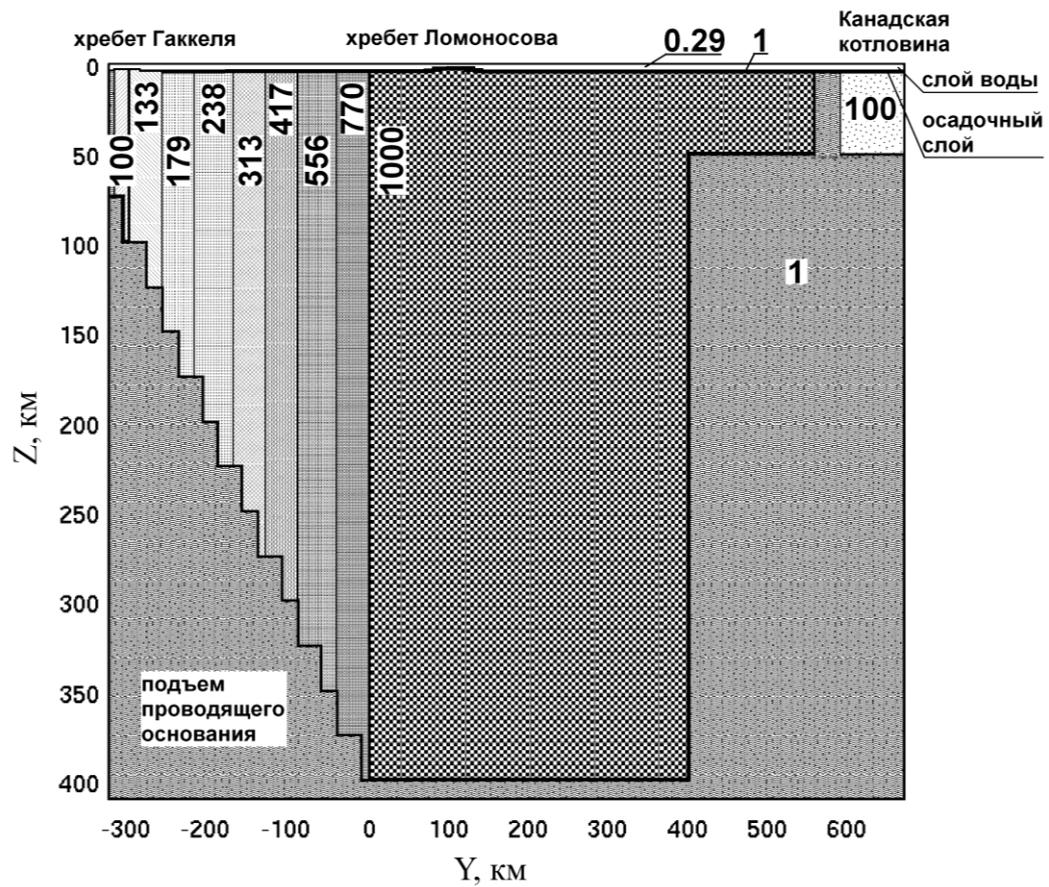


Рис. 5. Вертикальное сечение итоговой модели при $X = -70$ км

Для оценки чувствительности результатов к параметрам модели было проведено сравнение распределения значений малых полуосей на профиле $X=70$ км для итоговой модели и ее основных альтернатив. Оно показало, что выбранная модель оптимально соответствует наблюдаемым данным на выбранном периоде.

Итоговая модель имеет следующие особенности строения:

- 1) плавная зона понижения поверхности проводящего основания от оси хребта Гаккеля в сторону хребта Ломоносова;
- 2) отсутствует региональное разломное нарушение в зоне сочленения котловины Амундсена и хребта Ломоносова;
- 3) резкое поднятие проводящего основания под восточным склоном хребта Менделеева-Альфа на границе с Канадской котловиной;
- 4) континентальный тип земной коры под котловинами Макарова и Подводников;
- 5) континентальный тип коры под большей частью хребта Менделеева-Альфа, на границе с Канадской котловиной, резко переходящий в океанический.

Заключение

В ходе интерпретации данных магнитных измерений с мощным стационарным источником низкочастотного поля проведено моделирование крупных геологических структур в средней части Кольского полуострова и в районе Кольского залива. Несмотря на то, что интерпретировались измерения всего лишь по двум отдельным профилям, удалось построить трехмерные модели региона, позволившие уточнить разломную тектонику данного района полуострова и сделать некоторые выводы о блоковом строении и постгляциальном подъеме. Обнаружено, что наблюдаемое при измерениях на суше значительное превышение вертикальной магнитной компоненты поля над горизонтальными можно объяснить гальваническим береговым эффектом – циркуляцией тока по региональным разломам полуострова с замыканием его через море.

Исследованы возможности нахождения залежей углеводородов в перспективных геологических структурах арктического шельфа с помощью мощного низкочастотного электрического биполя, найдена оптимальная схема постановки – площадные измерения вертикальной компоненты

электрического поля при горизонтальной поперечной простиранию ориентации источника.

Проведена оценка перспектив и ограничений магнитотеллурических зондирований на геологических структурах Северного Ледовитого океана для картирования границ распространения континентального и океанического типов коры. Соответствующий типу коры тип литосферы уверенно определяется по глубине проводящего основания как по измерениям со дна океана, так и со льда.

Разработана методика использования естественного поля для проведения электромагнитных зондирований в Арктике с применением теории четырехкомпонентных магнитных индукционных векторов, компоненты которых имеют разную чувствительность к геометрии ионосферного источника и параметрам геоэлектрического разреза. Построен алгоритм нахождения эквивалентного источника естественного поля для исследуемой части акватории Северного Ледовитого океана по данным магнитовариационных наблюдений. В соответствии с этим алгоритмом решена обратная задача нахождения эквивалентного источника вариаций для приполюсной части акватории океана по данным магнитных наблюдений дрейфующих станций “Северный полюс”. С учетом найденного эквивалентного источника проведено трехмерное моделирование геоэлектрического разреза приполюсной части арктического бассейна по магнитовариационным данным. Полученная модель не противоречит современным геологическим представлениям о строении океана, а там, где оно остается дискуссионным, позволяет сделать выбор между конкурирующими гипотезами. В дальнейшем указанная методика может послужить основой для нового масштабного эксперимента на всей площади акватории Северного Ледовитого океана и построения его глобальной трехмерной модели.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в журналах, входящих в список ВАК:

1. Велихов Е.П., Жданов М.С., Кругляков М.С., Коротаев С.М., **Орехова Д.А.**, Щорс Ю.Г. Изучение возможности обнаружения газоконденсата в перспективной морской антиклинальной структуре методом низкочастотной электроразведки на примере Штокмановского месторождения в Баренцевом море // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 3-11.
2. Коротаев С.М., Жданов М.С., **Орехова Д.А.**, Кругляков М.С., Трофимов И.Л., Щорс Ю.Г., Шнеер В.С. Изучение возможности магнитотеллурического зондирования в Северном Ледовитом океане с помощью численного моделирования // Физика Земли. 2010. № 9. С. 35-47.
3. Коротаев С.М., Жданов М.С., **Орехова Д.А.**, Кругляков М.С., Трофимов И.Л., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Перспективы магнитотеллурических зондирований на некоторых крупных структурах Северного Ледовитого океана // Физика Земли. 2010. № 9. С. 48-54.
4. Велихов Е.П., Григорьев В.Ф., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Терещенко Е.Д., Щорс Ю.Г. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова мощным крайне низкочастотным источником // Доклады Академии Наук. 2011. Т. 438. № 3. С. 390–395.
5. Григорьев В.Ф., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Щорс Ю.Г. Результаты морского электромагнитного зондирования мощным удаленным источником в Кольском заливе Баренцева моря // Физика Земли. 2013. № 3. С. 75–86.
6. Трофимов И.Л., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Некоторые черты строения центральной части Северного Ледовитого океана по результатам моделирования магнитовариационных данных с учетом эквивалентного источника // Геофизические исследования. 2014. Т.15. №3. С. 50-70.
7. Grigoryev V.F., Korotaev S.M., Kruglyakov M.S., **Orekhova D.A.**, Shchors E.D., Tereshchenko Y.G., Tereshchenko M.S., Trofimov I.L. Preliminary Results of Marine Electromagnetic Sounding with a Powerful, Remote Source in

Kola Bay off the Barents Sea // International Journal of Geophysics. 2013. V. 2013. P. 1-8.

Материалы и тезисы докладов конференций:

1. **Орехова Д.А.** Электромагнитные зондирования с помощью искусственного контролируемого источника // Труды пятой Всероссийской конференции “Необратимые процессы в природе и технике”. – М.:МГТУ, 2009. С.182-183.

2. Велихов Е.П., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Щорс Ю.Г. Развитие прямых электромагнитных методов для поиска углеводородов в море // 2-я Международная Нобелевская научная конференция “Инновационные электромагнитные методы геофизики”, 25-28 августа 2010, Салехард. – М.: Научный мир, 2012. С. 210-218.

3. Велихов Е.П., Григорьев В.Ф., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Терещенко Е.Д., Щорс Ю.Г. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова с использованием мощного стационарного источника излучения КНЧ диапазона // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. Книга 1. – СПбГУ, 2011. С. 201-204.

4. Трофимов И.Л., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Шнеер В.С., Щорс Ю.Г. Некоторые черты строения центральной части Северного Ледовитого океана по результатам моделирования магнитовариационных данных с учетом эквивалентного источника // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. Книга 2. – СПбГУ, 2011. С. 115-118.

5. Григорьев В.Ф., Жданов М.С., Кругляков М.С., Коротаев С.М., **Орехова Д.А.**, Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Трофимов И.Л., Щорс Ю.Г. Результаты донного электромагнитного зондирования с удаленным источником в Кольском заливе // II Международная конференция “Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем”, Киев, 1-4 октября 2012. С. 32.

6. Трофимов И.Л., Жданов М.С., Коротаев С.М., Кругляков М.С., **Орехова Д.А.**, Попова И.В., Шнейер В.С., Щорс Ю.Г. Некоторые черты строения Северного Ледовитого океана по магнитовариационным данным // VI Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна – ЭМЗ-2013, 2-6 сентября 2013, Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2013. С.П-73-76.

7. Zhdanov M.S., Kruglyakov M.S., Korotaev S.M., **Orekhova D.A.**, Trofimov I.L., Shneyer V.S., Schors Y.G. Perspectives of the MT sounding in the Arctic Ocean // In: Electromagnetic soundings: theory and applications: Proceedings of the International Workshop on EM Sounding in memory of Professors Mark N. Berdichevsky and Peter Weidelt. – Moscow-Zvenigorod. 2010. P. 58.

8. Velikhov E.P., Zhdanov M.S., Korotaev S.M., Kruglyakov M.S., **Orekhova D.A.**, Popova I.V., Trofimov I.L., Shneyer V.S., Shchors Yu.G. Perspectives of the electromagnetic sounding in the Arctic Ocean // AGU Fall Meeting, 2010.

9. Grigoryev V.F., Korotaev S.M., Kruglyakov M.S., **Orekhova D.A.**, Schors Y.G., Tereshchenko E.D., Tereshchenko M.S., Trofimov I.L., Zhdanov M.S. Preliminary Results of Marine Electromagnetic Sounding with a Powerful Remote Source in Kola Bay of the Barents Sea // AGU Fall Meeting, 2012. P. T21B-2558.

10. I. Trofimov, M. Kruglyakov, S. Korotaev, **D. Orekhova**, I. Popova, V. Shneyer, Y. Schors, M. Zhdanov A novel approach to asynchronous MVP data interpretation based on elliptical-vectors // Conference: 22nd EM Induction Workshop, At Weimar, Germany. DOI: 10.13140/2.1.1065.9204

Подписано в печать 04.12.2015
Объем: 1,0 усл. печ. л.
Тираж: 100 шт.
Отпечатано в типографии «Реглет» 105005,
г. Москва, ул. Рождественка, 5/7, стр.1