


На правах рукописи



Пушкарев Павел Юрьевич

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРО-
МАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕШЕНИЮ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

Специальность

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора геолого-минералогических наук

МОСКВА – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Белявский Виктор Владимирович**,
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник Центра геоэлектромагнитных
исследований Института физики Земли РАН,
г. Москва

Мороз Юрий Федорович,
доктор геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией Института
вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский

Персова Марина Геннадьевна,
доктор технических наук, профессор
Новосибирского государственного технического
университета, г. Новосибирск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»

Защита диссертации состоится 7 июня 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.501.001.64 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27, сектор «А», этаж 8, к. 812) и на сайте в системе "Наука-МГУ" (ИСТИНА) по адресу: <http://istina.msu.ru/dissertations/47356271/>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Тема повышения эффективности интерпретации данных низкочастотных электромагнитных (ЭМ) зондирований не теряет своей актуальности. На данный момент тому есть две основные причины.

Первая связана с быстрым развитием вычислительной и измерительной техники, обусловившим возможности получения многокомпонентных высокоточных данных в широком частотном диапазоне по густой сети наблюдения и применения ресурсоёмких методов обработки и интерпретации данных, в частности, многомерных методов инверсии: 2D (на персональных компьютерах) и 3D (на компьютерных кластерах). Появляются многочисленные новые подходы и программы для интерпретации данных, позволяющие проводить её на высоком уровне.

Вторая причина заключается в недостаточной востребованности и понимании результатов ЭМ зондирований геологами и геофизиками. В области глубинных исследований этому способствует недостаточно изученная природа аномалий электропроводности, расположенных на недоступных для бурения глубинах.

Таким образом, актуальным является как внедрение новых математических методов интерпретации, так и повышение качества её физико-геологической результативности. Последнее достигается использованием априорной информации, комплексированием разных методов, истолкованием результатов с оценкой надёжности и детальности построений.

Представляется полезным подойти к проблеме повышения эффективности интерпретации ЭМ зондирований максимально широкого с точки зрения диапазонов частот, глубин, решаемых задач. Как известно, несмотря на существенные различия аппаратных комплексов и методик наблюдений, и глубинные и малоглубинные низкочастотные ЭМ технологии основаны на единой квазистационарной модели ЭМ поля и могут использовать общие методы интерпретации данных. В то же время, при решении разных задач приоритет может даваться разным методам, например, при изучении

осадочного бассейна может оказаться оправданным одномерный (1D) подход, зоны субдукции – двухмерный (2D), рудного месторождения – трёхмерный (3D). Оптимальный для каждой конкретной ситуации арсенал методов и приёмов (стратегия интерпретации) может быть выбран как частный случай общей методики на основе имеющегося опыта и анализа полученных данных.

Степень разработанности проблемы и её отражение в структуре работы

Разработкой методов ЭМ зондирований занимались многие геофизики, и трудно однозначно очертить круг тех, чей вклад был наибольший. Ссылки и краткие исторические отступления присутствуют в тексте работы. Пионерские работы провели Французские исследователи. В СССР их продолжили геофизики Ленинградской, Московской, Новосибирской, Киевской, Иркутской, Уральской, Саратовской научных школ и другие. За рубежом большинство результатов было получено в Европе и Северной Америке.

Развиваются применительно к решению всё более сложных задач использующие естественное поле магнитотеллурические (МТ) методы, использующие вариации электрического и магнитного полей, и магнитовариационные (МВ), использующие только магнитные вариации, а также методы зондирования с управляемым искусственным источником – частотное (ЧЗ) и становлением поля (ЗС). Их современное состояние рассмотрено в главе 1, которая в основном носит обзорный характер.

Большое число работ посвящено методам анализа и интерпретации данных ЭМ зондирований, их обобщение сделано в главе 2. В ней отражено то, что 2D и 3D подходы наиболее развиты в магнитотеллурике, применительно к зондированиям с искусственным источником по-прежнему широко применяется 1D интерпретация.

С помощью глубинной геоэлектрики (в основном магнитотеллурики) на всех континентах выявлены аномалии повышенной электропроводности в консолидированной земной коре. Результаты, полученные в нескольких регионах с участием автора на этапе интерпретации, а в некоторых случаях и начиная с этапа полевых наблюдений, составляют содержание главы 3.

Методы ЭМ зондирования применяются и при поиске и разведке месторождений углеводородов, твёрдых полезных ископаемых и геотермальных ресурсов, а также в инженерной геофизике. Некоторые работы, выполненные по этой тематике с участием автора, представлены в главе 4.

Таким образом, проблема, затрагиваемая в диссертационной работе, разрабатывается достаточно интенсивно.

Цель исследований

Целью работы является совершенствование методики интерпретации глубинных и малоглубинных электромагнитных зондирований, в первую очередь магнитотеллурических, и решение, на основе её применения, ряда фундаментальных и прикладных геологических задач.

Задачи исследований

1. Обобщение современных методик МТ и МВ зондирований в диапазоне периодов от миллионных долей секунды (частоты до сотен кГц) до миллионов секунд (несколько месяцев), а также современных методик ЭМ зондирований с управляемыми источниками в частотной и временной области с гальваническим и индукционным возбуждением поля.

2. Развитие методики анализа и интерпретации МТ данных, позволяющей выявлять основные аномалии, оценивать размерность среды и простирание структур, выполнять инверсию для разных размерностей и параметризаций модели, выбрав оптимальный метод инверсии на основе анализа данных и априорной геолого-геофизической информации.

3. Анализ и интерпретация МТ данных, полученных в платформенных условиях, зонах коллизии и субдукции, и построение геоэлектрических моделей земной коры и верхней мантии, с учётом оценки возможностей интерпретации на синтетических данных, рассчитанных для моделей (а) зоны субдукции, (б) коровых аномалий, перекрытых осадочной впадиной, (в) анизотропных коровых и мантийных аномалий.

4. Анализ и интерпретация ЭМ данных, полученных при поиске и разведке нефтегазовых, рудных и геотермальных месторождений, при решении

инженерно-гидрогеологических задач, с учётом результатов 3D моделирования типичных объектов этих исследований, а в некоторых случаях также инверсии модельных данных.

Научная новизна работы

В работе представлен ряд оригинальных научных результатов, связанных с развитием методики интерпретации МТ и других ЭМ данных и получением новых геологических результатов. Они относятся к следующим основным направлениям.

1. Построены обобщённые (абстрактные) геоэлектрические модели ряда объектов исследования глубинной и разведочной геоэлектрики, выполнен анализ модельных данных для оценки чувствительности к элементам моделей.

2. Выполнена инверсия модельных данных, отвечающих некоторым обобщённым моделям, для оценки особенностей методов и программ 1D, 2D и 3D инверсии и выбора оптимальной методики интерпретации.

3. Построены глубинные геоэлектрические модели нескольких регионов с разным тектоническим режимом, оценена структура аномалий коровой электропроводности, сделаны предположения о природе коровых аномалий.

4. Оценены возможности современных методов анализа и интерпретации ЭМ данных при решении задач нефтегазовой, рудной, геотермальной и инженерной геофизики.

Практическая значимость работы

В работе сформулирована и показана на примерах современная методика ЭМ зондирований и интерпретации данных на разных частотах, применение которой повышает эффективность глубинных и разведочных исследований.

Применение ЭМ зондирований по этой методике в различных регионах позволило решить конкретные геологические задачи: глубинные, нефтегазовые, рудные, геотермальные и инженерные.

Ряд разделов работы входит в содержание спецкурсов, читаемых автором для магистрантов кафедры геофизики геологического факультета МГУ.

Разработанное автором и под его руководством программное обеспечение для 1D интерпретации ЭМ данных, анализа МТ данных, визуализации и переформатирования результатов 1D, 2D и 3D инверсии МТ данных, применяется более чем в десяти образовательных, научных и производственных организациях в России и за рубежом.

Защищаемые положения

1. Построены обобщённые геоэлектрические модели следующих геологических объектов: зона субдукции, коровые аномалии под осадочной впадиной, анизотропные коровые аномалии, платформенный осадочный чехол, залежь углеводородов на шельфе, рудные тела, геотермальные месторождения, ослабленные зоны в скальных породах. На основе применения методов анализа и инверсии к синтетическим данным, рассчитанным для этих моделей, оценены возможности методов ЭМ зондирования и выбраны оптимальные методики интерпретации.

2. Сформулирована общая методика анализа и интерпретации МТ данных, включающая следующие этапы: оценка и подавление приповерхностных искажений; оценка размерности и простираения структур; формирование набора инвертируемых компонент; составление априорной модели; автоматическая инверсия данных; интерактивная коррекция модели; оценка трёхмерных эффектов; оценка чувствительности к элементам модели; физико-геологическое истолкование.

3. Большинство протяжённых аномалий электропроводности в консолидированной земной коре маркирует древние или современные границы коровых блоков, эти зоны благоприятны для повышенного тепломассопереноса и участвуют в формировании геодинамической активности. Соотношение вклада электропроводящих минералов и вклада флюидов в электропроводность аномалий для тектонически стабильных регионов выше, чем для активных. В последних также присутствуют аномалии, которые обусловлены плавлением горных пород и могут быть не связаны с тектоническими границами.

4. За счёт выбора оптимальных методик интерпретации МТ данных, решён ряд практических геологических задач, характеризующихся разными типами изучаемых объектов, масштабами и глубинами исследования: выделение нефтегазоперспективных структур, оконтуривание областей различных типов оруденения, разведка геотермальных зон, изыскания под строительство объектов, оценка ресурсов подземных вод.

Апробация и публикации

Результаты диссертационной работы докладывались автором самостоятельно или соавторами докладов на примерно 30 международных и 60 российских научных конференциях: “International Geological Congress”, Florence 2004, Oslo 2008, Brisbane 2012, Cape Town, 2016; “American Geophysical Union Fall Meeting”, San Francisco 2013; “General Assembly of the European Seismological Commission”, Moscow 2012; “IUGG General Assembly”, Sapporo 2003, Melbourne 2011, Prague 2015; “IAGA Scientific Assembly”, Toulouse 2005, Sopron 2009, Merida 2013; “Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth”, Santa Fe 2002, El Vendrell 2006, Beijing 2008, Giza 2010, Darwin 2012, Weimar 2014, Chiang Mai 2016; “Marine Electromagnetics Conference MARELEC”, Hamburg 2013; “Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining”, Barcelona 2016; “China International Geo-electromagnetic Induction Workshop”, Changsha 2015; “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg 2012, 2014; «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», Бишкек 2008, 2012, 2014; «Новые идеи в науках о Земле», Москва 2003, 2005, 2015; «Геофизические чтения имени В.В. Федынского», Москва 2002, 2003, 2004, 2006, 2008; «Инженерная и рудная геофизика», Геленджик 2005, 2006, 2007, 2008, 2010; «Школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли», Москва 2003, 2007, 2009, Санкт-Петербург 2011, Новосибирск 2013, Иркутск 2015; «Ломоносовские чтения (секция геология, подсекция геофизика)», Москва 2000, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008, 2009, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016; и других.

По теме диссертации опубликовано 24 статьи во включенных в список ВАК и 5 в иностранных реферируемых журналах, около 150 статей и тезисов

докладов в других изданиях, получено 2 патента на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программ.

Личный вклад

С участием автора были выполнены следующие работы (в порядке представления в тексте диссертации):

- Моделирование зоны субдукции;
- Моделирование нефтегазоносного шельфа;
- 2D инверсия синтетических данных над впадиной;
- Оценка влияния анизотропии глубинных проводящих зон;
- 3D инверсия данных, рассчитанных на одиночном профиле;
- Построение модели Барятинской коровой аномалии;
- Построение модели Ладожской коровой аномалии;
- Построение модели Транс-Европейской шовной зоны;
- Построение модели Киргизского Тянь-Шаня;
- Построение модели Гарвальских Гималаев;
- Построение модели Каскадной зоны субдукции;
- Моделирование осадочного чехла, рудных тел и геотермальных зон;
- Выявление региональных и локальных нефтеперспективных структур;
- Оконтуривание областей оруденения низкого и высокого сопротивления;
- Построение геоэлектрических моделей геотермальных зон;
- Оценка перспектив исследований петротермальных ресурсов;
- Поиск разрушенных и обводнённых зон в скальных массивах.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы 167 машинописных страниц, она содержит 86 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 268 наименований, в том числе 115 иностранных.

Благодарности

Большинство результатов, приведенных в работе, получено в соавторстве с коллегами, которым автор искренне признателен.

Руководили работами, в рамках которых в том числе был получен ряд представленных материалов, М.Н. Бердичевский, В.П. Бубнов, Л.Л. Ваньян, Ив.М. Варенцов, В.И. Дмитриев, М.С. Жданов, А.А. Парамонов, Б.П. Петрухин, А.К. Рыбин, В.Ю. Семёнов, Е.Ю. Соколова, В.В. Спичак, В.К. Хмелевской, М.Д. Хуторской, А.Г. Яковлев, Е. Янковский.

Автору посчастливилось работать со многими замечательными коллегами, наиболее активным было сотрудничество с Е.Д. Александровой, Д.А. Алексеевым, Н.С. Голубцовой, А.В. Кошурниковым, В.А. Куликовым, Н.Л. Шустовым.

Некоторые из представленных результатов получили под руководством автора студенты и аспиранты Д. Бойченко, М. Верещагина, Е. Гладышева, Т. Егорова, Е. Иванова, П. Иванов, А. Матвеев, Е. Мойланен, Д. Силёва, К. Слепых, Е. Татарова, О. Тихомиров, Ф. Щербина, Я. Таран.

Отдельно автор хотел бы отметить, что своими достижениями в геофизике обязан учебе у основателей научной школы МГУ по электромагнитным зондированиям Земли М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна и В.И. Дмитриева.

Хотелось бы выразить признательность А.Г. Яковлеву, под чьим руководством автор получил ценный практический опыт, А.А. Булычеву, без чьего благожелательного отношения и мягкого давления данная работа вряд ли была бы написана, и всему коллективу кафедры геофизики геологического факультета МГУ за дружескую рабочую атмосферу.

Особую благодарность автор хотел бы выразить за постоянное внимание и помощь В.К. Хмелевскому, предложившему саму идею единого подхода к зондированию во всём используемом частотном диапазоне.

Основное содержание работы

Введение

Во введении рассмотрены актуальность темы исследования, степень разработанности проблемы, цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, защищаемые положения, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе автора, структуре диссертации.

Глава 1. Современное состояние методов электромагнитного зондирования земной коры

В главе 1 рассмотрены ЭМ методы с естественными источниками, а затем ЭМ методы с искусственными источниками.

Основным возбудителем естественного ЭМ поля на частотах ниже 1 Гц является нестационарная токовая система в магнитосфере и ионосфере, формирующаяся под воздействием порывов «солнечного ветра». На частотах выше 1 Гц поле в первую очередь обусловлено удалённой грозовой активностью, в основном локализованной в тропических широтах. На частотах свыше 10 кГц появляется ещё один источник ЭМ поля, строго говоря, являющийся искусственным (техногенным) – передатчики радиостанций.

Классическая схема магнитотеллурического зондирования (МТЗ) основана на использовании тензора импеданса $[Z]$, связывающего горизонтальные электрические и магнитные составляющие поля. К настоящему времени решен ряд теоретических и технических вопросов, связанных с измерениями ЭМ поля, обработкой записей, анализом и интерпретацией получаемых параметров, что позволяет применять метод для решения широкого круга геологических задач.

Возможности МТЗ расширяет использование дополнительных передаточных функций: матрицы Визе-Паркинсона (или типпера) $[W]$, которая связывает вертикальную и горизонтальные магнитные компоненты, а также магнитного тензора $[M]$ и теллурического тензора $[T]$, связывающих соответственно горизонтальные магнитные и электрические компоненты в

рядовой и базовой точках. В частности, [W] и [M] с понижением частоты освобождаются от влияния приповерхностных неоднородностей.

Большую глубинность, обеспечивающую изучение мантии Земли, даёт метод глубинного магнитовариационного зондирования (ГМВЗ). Он основан на измерениях длиннопериодных геомагнитных вариаций с использованием магнитных обсерваторий и спутников. Применяя методы пространственных производных и отношения компонент поля, можно определить импеданс магнитовариационного типа. Обратная задача решается в 1D и 3D постановке с учётом сферичности Земли.

При решении разведочных и малоглубинных задач широко применяются модификации метода МТЗ в диапазоне аудио-частот (20 Гц – 20 кГц) и радио-частот (10 кГц – 1 МГц): АМТЗ и РМТЗ. Интересным представляется метод радиоволнового интерференционного зондирования (РВИЗ), работающий на частотах 100 кГц – 100 МГц, где начинают превалировать токи смещения.

Существенной спецификой обладают донные МТЗ. На этапе наблюдений это выражается в применении автономных донных станций с короткими линиями для измерения электрических компонент поля. Толща морской воды гасит высокочастотную составляющую поля, а также сказывается на характере аномалий, возникающих над неоднородностями.

Рассмотрение методов естественного ЭМ поля завершается примером, иллюстрирующим возможности МТЗ при изучении зон субдукции. Выполненное нами 2D моделирование показывает высокую чувствительность различных компонент МТ данных к коровым и верхнемантийным проводящим структурам, связанным с термальным и флюидным режимом этих зон.

ЭМ зондирования с искусственным источником могут выполняться как с индукционным возбуждением (незаземленная петля или рамка), так и с гальваническим (заземленная линия), при этом их чувствительность может существенно измениться. Кроме того, зондирования могут проводиться как в частотной области (метод частотного зондирования ЧЗ), так и во временной области (метод зондирования становлением поля ЗС).

Использование искусственного источника позволяет изучать, помимо электропроводности, поляризационные характеристики среды. Разделение

индукционной и поляризационной составляющих сигнала является особой проблемой. При исследованиях в частотной области её решают с помощью относительных фазовых параметров, а во временной – с использованием дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ).

Морские ЭМ зондирования с искусственным источником вначале использовались для изучения океанической коры и рифтов, а в сейчас активно применяются при нефтегазовых исследованиях. При большой глубине моря обычно используются донные измерительные станции и заглубленный буксируемый источник, на шельфе чаще всего применяются буксируемые за судно питающая и приёмная линии.

В качестве примера, демонстрирующего возможности ЭМ зондирований с гальваническим источником на шельфе, приведены результаты выполненного нами моделирования. Если вмещающий разрез является проводящим, то на кривых ЗС возникают яркие аномалии при появлении высокоомного и поляризующегося пластов, характерных для месторождений углеводородов.

Глава 1 завершается разделом, посвящённым частотным диапазонам и глубинности методов зондирования. Эту глубинность принято оценивать, как толщину скин-слоя, в пределах которого поле затухает в $e \approx 2.7$ раз. Толщина скин-слоя h_s (м) связана с сопротивлением среды ρ (Ом·м) и периодом колебаний поля T (с) по формуле:

$$h_s = \frac{\sqrt{10^7 \cdot \rho \cdot T}}{2\pi}.$$

На рисунке 1 показаны зависимости толщины скин-слоя от периода для четырёх значений сопротивления среды. Горизонтальные линии отмечают примерные частотные диапазоны ЭМ методов. Большинство составляют магнитотеллурические: РМТЗ, АМТЗ, МТЗ, ГМТЗ. В области длинных периодов их дополняет ГМВЗ. Из методов с управляемыми источниками более высокочастотным является метод РВИЗ, далее следует ЧЗ. Последнему по глубинности примерно соответствует метод ЗС во временной области.

ЭМ методы (если учитывать только низкочастотные, без РВИЗ) перекрывают диапазон периодов примерно от 10^{-6} до более чем 10^8 с, что при

сопротивления среды $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ отвечает диапазону глубин примерно от метра до тысячи километров.

Обобщение опыта применения низкочастотных электромагнитных зондирований показывает, что в наиболее широком частотном диапазоне используется метод МТЗ, основанный на простой плосковолновой модели поля и не требующий искусственных источников. Его модификациями являются глубинное МТЗ (частоты 10^{-4} - 10^{-2} Гц), разведочное МТЗ (10^{-3} - 10^2 Гц), малоглубинные аудио-МТЗ и радио-МТЗ (10^1 - 10^4 Гц и 10^4 - 10^6 Гц). Методы ЧЗ и ЗС, использующие искусственный источник, обеспечивают повышенную точность, особенно при сильных промышленных помехах, что в ряде случаев обосновывает их применение вместо МТЗ.

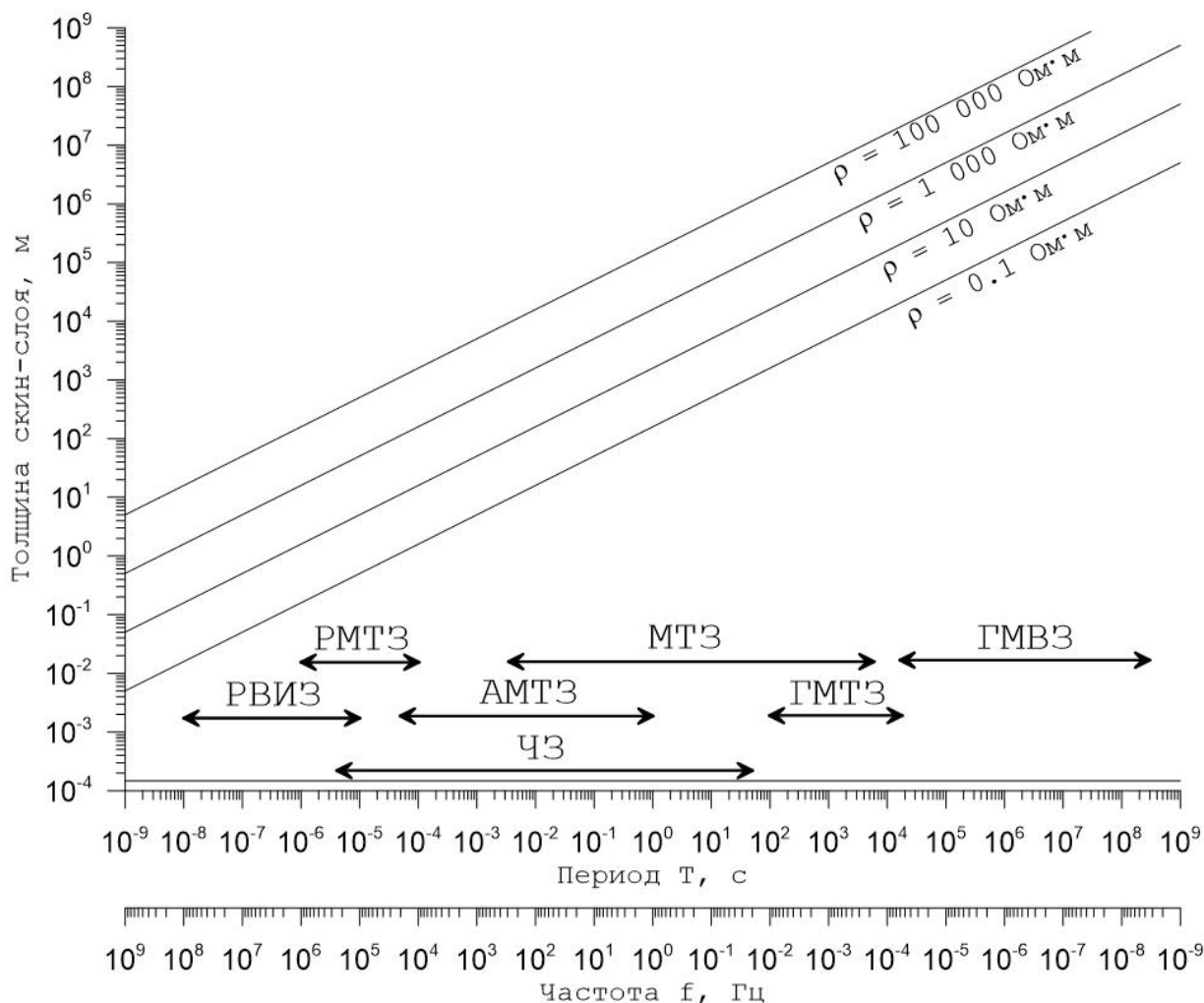


Рисунок 1. Рабочие диапазоны частот методов ЭМ зондирования и соответствующие глубины исследования (толщины скин-слоя) при различных сопротивлениях однородной среды.

Глава 2. Методика анализа и интерпретации электромагнитных данных

В главе 2 вначале рассматривается методика анализа и интерпретации данных всех ЭМ зондирований применительно к слоистым средам, а затем – МТ зондирований горизонтально-неоднородных сред.

Основной формой представления данных ЭМ зондирований является кажущееся сопротивление. В работе приведены формулы для его расчёта по значениям всех компонент поля электрического и магнитного диполей в приближениях дальней и ближней зон источника. Рассмотрены принципы анализа и трансформации кривых кажущегося сопротивления и фазовых кривых, приведены примеры способов трансформации кривых МТЗ и ЗС.

На примере электрической компоненты поля электрического диполя рассмотрено решение прямой одномерной задачи ЭМ зондирований, реализованное нами в программе EM1D. Описаны принципы одномерной интерпретации кривых ЭМ зондирований в свете теории регуляризации Тихонова.

Анализ данных МТ зондирований горизонтально-неоднородных сред во многом определяет успех последующей инверсии, поскольку на нём выбираются методы решения обратной задачи, формируется ансамбль данных для инверсии, могут быть подавлены приповерхностные искажения. В работе рассмотрены особенности полярных диаграмм и инвариантов тензора импеданса $[Z]$, определение его главных значений и направлений, разделение его локальной и региональной составляющих. Кратко изложены принципы анализа матрицы Визе-Паркинсона $[W]$.

Особенностью МТ поля в 2D среде является его разделение на две поляризации, связанные с токами, текущими вдоль и вкост структур. Для решения обратных 2D задач разными авторами разработано множество программ, большинство из которых реализуют принцип «сглаживающей» инверсии, реже используется «блочная» инверсия и другие подходы. При инверсии следует учитывать имеющийся опыт изучения разной

чувствительность двух поляризаций к изучаемым структурам и их разной устойчивости к 2D аппроксимации реальных структур.

В работе приведены полученные нами результаты изучения этого вопроса применительно к широко встречающейся ситуации, когда глубинные протяжённые аномалии в земной коре перекрыты трёхмерной осадочной впадиной. 2D инверсия различных компонент синтетических (рассчитанных для известной модели) данных показала, что в данном случае наилучший результат обеспечивает использование квазипоперечного (связанного с токами поперек структур) импеданса для изучения верхней части разреза и типпера (связанного с токами вдоль структур) – для выделения глубинных проводящих неоднородностей.

Далее выполнена краткая оценка возможностей магнитотеллурики распознать анизотропию в коровых и мантийных проводящих зонах. Часто полагается, что устойчивое различие главных значений тензора импеданса, наблюдаемое в обширной области, говорит в пользу анизотропии среды. Выполненное нами 2D моделирование показало, что для относительно узких анизотропных проводников, перекрытых высокоомными породами литосферы, кривые МТЗ практически совпадают с кривыми, отвечающими изотропным моделям с теми же интегральными проводимостями структур.

3D инверсия МТ данных в последние годы применяется достаточно широко, для неё создан ряд программ и ведётся разработка новых. В то же время, возможности 3D инверсии остаются поводом для дискуссий.

В частности, для выполнения 3D инверсии, позволяющей получать объёмные геоэлектрические модели, желательно использовать площадной набор данных. Однако зондирования нередко выполняются по одиночным или удаленным друг от друга профилям. Мы исследовали возможности трёхмерной инверсии данных такого рода на примере трёхслойной модели, содержащей три локальные неоднородности. Вначале было показано, что с помощью простых методов анализа данных и их 1D или 2D инверсии можно построить фоновый разрез и определить положение всех трёх неоднородностей. Далее мы

использовали эту информацию для построения нескольких вариантов стартовой модели и осуществили сглаживающую трёхмерную инверсию данных. Опыты показали, что включение в эту модель фонового разреза позволяет программе инверсии построить модель, по всем параметрам близкую к истинной. В то же время включение неоднородностей в стартовую модель в виде однородного полупространства не позволило получить такую модель. Аналогичный результат был получен затем и при использовании вместо локальных неоднородностей протяжённой проводящей зоны, состоящей из трёх звеньев разных азимутов.

Глава 2 завершается разделом, посвящённым общему графу магнитотеллурических исследований. Рассматривается место методов анализа и интерпретации МТ данных в общей последовательности этапов МТ исследований (глубинных, разведочных, малоглубинных) (Рисунок 2).

I. Проектирование исследований. Осуществляется сбор геолого-геофизической информации, составляются априорные модели, проводится математическое моделирование ожидаемых аномалий. Оценивается доступность точек наблюдения и уровень помех. В итоге выбирается оптимальная технология наблюдений.

II. Полевые наблюдения. Вначале проводятся регламентные работы по подготовке аппаратуры (калибровка, тест на идентичность и т.д.). Основную часть работ составляют измерения в рядовых точках. Результатом этапа является набор данных, представляющий собой наибольшую ценность, будь то научный эксперимент или производственные работы.

III. Обработка данных. На этом этапе происходит переход от временных рядов компонент поля в частотную область, к комплексным компонентам матриц $[Z]$, $[W]$, $[M]$, $[T]$, не зависящим от источника. Важной составляющей является подавление промышленных и других помех, с использованием синхронных записей и с помощью статистических методов.

IV. Анализ и интерпретация данных.

1). Оценка и подавление приповерхностных искажений. Применяются методы нормализации кривых, т.е. их смещения к определённому уровню, или

методы декомпозиции данных, т.е. вычисления передаточных функций, устойчивых к приповерхностным искажениям.

2). Оценка размерности и простирания структур. Анализируются частотные разрезы инвариантных параметров, карты полярных и векторных диаграмм. Локализируются основные структуры, оценивается их вытянутость, для 2D инверсии необходимо определить простирание. В результате выбирается методика дальнейшей интерпретации данных.

3). Формирование набора инвертируемых компонент. Для 1D инверсии обычно выбирается инвариантная компонента Z_{ef} . Для 2D инверсии данные поворачиваются к главным направлениям, обычно средним по профилю, в этом случае положение точек наблюдения проецируется на профиль соответствующего азимута.

4). Составление априорной модели. Задается сетка по глубине и, в зависимости от выбранной размерности, по горизонтали. На основе имеющейся информации задаются априорные значения сопротивления. Если верхняя часть разреза (ВЧР) характеризуется 1D строением, при 2D и 3D инверсии в априорную модель может быть включен результат 1D интерпретации по ВЧР.

5). Автоматическая инверсия данных. Строится геоэлектрическая модель, согласующаяся с наблюдаемыми данными и близкая к априорной модели. При этом часть параметров модели может быть жёстко или полужёстко закреплена. Чаще всего применяется сглаживающая инверсия, хотя используются и другие виды стабилизации решения.

6). Интерактивная коррекция модели. При 1D интерпретации применяется широко и часто без предварительной автоматической инверсии, обеспечивая простой учёт априорной информации о глубинах залегания границ. При 2D и 3D трудоемка и применяется реже, но позволяет получить наглядную генерализованную модель для дальнейшего истолкования.

7). Оценка трёхмерных эффектов. Может выполняться на основе 3D моделирования в случае площадных исследований при использовании 1D и 2D методов инверсии. При профильных исследованиях и использовании 1D инверсии может осуществляться оценка двумерных эффектов с помощью 2D моделирования.

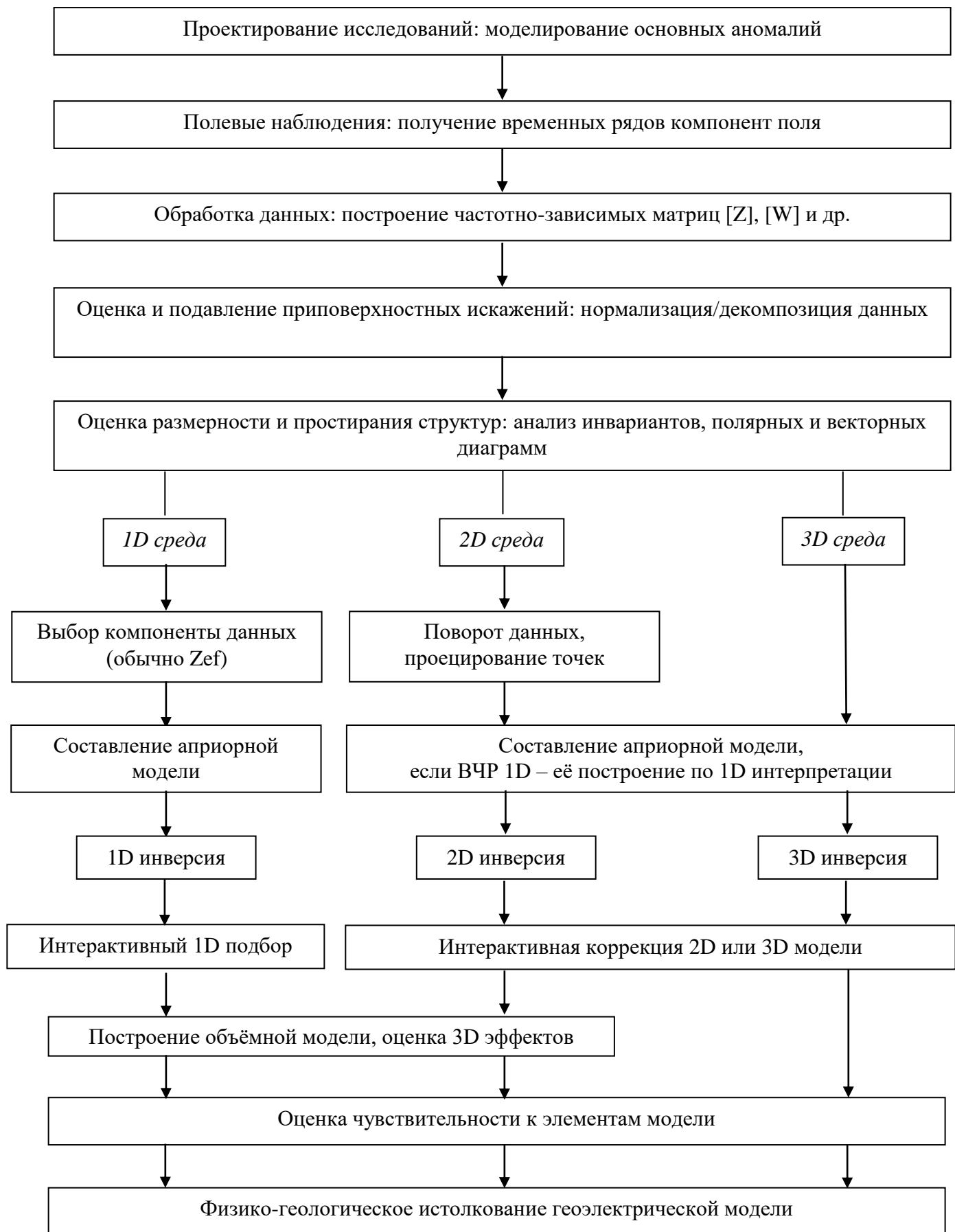


Рис. 2. Обиций граф магнитотеллурических исследований.

8). Оценка чувствительности к элементам модели. Составляются варианты итоговой модели, из которых поочерёдно исключаются её ключевые элементы (их сопротивления заменяются на фоновые значения). По изменению невязок оценивается необходимость их включения в модель.

9). Физико-геологическое истолкование. Геоэлектрическая модель анализируется в комплексе с другой геолого-геофизической информацией совместно со специалистами в области решения поставленной геологической задачи. Делается заключение по решению этой задачи.

Таким образом, достоверность и детальность результатов магнитотеллурики существенно зависят от методики интерпретации данных. Она должна включать в себя методы анализа данных для выявления в них основных аномалий и приповерхностных искажений, для оценки размерности среды и простираня структур, а также набор методов инверсии данных для разных размерностей и вариантов параметризации модели среды. Выбор методов инверсии осуществляется с учетом опыта интерпретатора на основе анализа данных и на основе априорных сведений о геологическом строении изучаемого района.

Глава 3. Некоторые результаты глубинных геоэлектрических исследований

В главе 3 рассмотрены методика и результаты изучения консолидированной земной коры и верхней мантии нескольких регионов, полученные с участием автора.

Исключение составляет первый раздел, посвящённый выполненному в рамках госпрограммы в конце 1980-х годов большим коллективом учёных из разных регионов страны под руководством М.Н. Бердичевского обобщению всех имевшихся сведений о коровых аномалиях электропроводности на территории СССР.

Барятинская аномалия электропроводности проявляется при переходе от юго-западной части Московской синеклизы к северо-западной части Воронежской антеклизы, при понижении проводимости экранирующего осадочного чехла примерно до 50 См. На современном этапе она изучается в

рамках охватывающего существенно большую территорию проекта «Кировоград», инициированного Ив.М. Варенцовым. Применяется современная схема глубинных исследований, включающая разведочные МТ зондирования (одна точка в день, аппаратура с индукционными магнитными датчиками), дополняемые по той же или по более редкой сети глубинными МТ зондированиями (одна точка в несколько дней, аппаратура с феррозондовыми магнитометрами). Выполненная нами двухмерная инверсия по субширотным профилям вкрест Бярятинской аномалии свидетельствует, что она залегает на глубинах свыше 10 км, её ширина составляет до 100 км, а сопротивление – первые десятки Ом*м на фоне примерно 1000 Ом*м у вмещающих пород. Аномалия электропроводности коррелирует с интенсивной аномалией постоянного магнитного поля, связанной с железистыми кварцитами, которые, однако, залегают в верхней части кристаллического фундамента. Такая корреляция и протяжённый характер аномалии может говорить о приуроченности Бярятинской аномалии к шовной зоне, разделяющей блоки фундамента.

Ладожская аномалия электропроводности расположена на юго-востоке Балтийского щита. В последние годы по инициативе Е.Ю. Соколовой выполнены разведочные МТ зондирования, дополненные опорными глубинными, на профиле Выборг-Суоярви северо-восточного направления. Анализ МТ данных показал северо-западное простирание структур, что благоприятствует 2D инверсии МТ данных. По её результатам в северо-восточной части профиля выделился высокоомный блок земной коры, чётко коррелируемый с Карельским кратоном. На большей части профиля, отвечающей Свекофенскому аккреционному орогену, сопротивления понижены, причём выделяются два основных ядра аномалии, каждое шириной порядка 50 км. Значения сопротивлений местами понижаются до единиц Ом*м, что свидетельствует в пользу, скорее, электропроводящей природы аномалии, тем более что соответствующие минералы (графит, сульфиды) распространены в изучаемом районе. Впрочем, не исключен и вклад ионопроводящего механизма электропроводности, т.е. флюидонасыщенности,

которая может быть связана с глубинными разломами, также известными в аномальной зоне.

Транс-Европейская шовная зона отделяет древнюю Восточно-Европейскую платформу на северо-востоке от более молодых структур на юго-западе. Один из пересекающих эту зону профилей, от Карпат до Белорусской антеклизы, проходит по территории Польши, где инициатором МТ исследований был Е. Янковский. Нами был выполнен анализ МТ данных, показавший применимость 1D приближения на высоких частотах и 2D – на низких, за исключением отдельных точек с существенными 3D эффектами. Строение осадочного чехла было получено с помощью 1D подбора кривых, сглаживающая 2D инверсия позволила локализовать глубинные коровые аномалии, а итоговая блочная модель была получена путём интерактивного 2D подбора. Наиболее интересными элементами полученной модели являются два проводящих глубинных разлома, один на юго-западной границе Транс-Европейской шовной зоны, а другой под краем Восточно-Европейской платформы. Интересно, что по сейсмическим данным именно между выявленными разломами наблюдается коровая зона повышенных скоростей.

Верхняя мантия Восточной Европы стала объектом исследования в рамках проекта SEMES, организованного В.Ю. Семеновым. Использовались многолетние данные геомагнитных обсерваторий региона, дополненные данными специально выполненных глубинных МТЗ. 1D интерпретация сводных кривых МТЗ-ГМВЗ была выполнена несколькими участниками проекта по разным программам. Осреднённый результат в виде карты суммарной проводимости верхней мантии до глубины 200 км чётко показал, что в Центральной Европе и в Транс-Европейской шовной зоне это проводимость в 2-4 раза выше, чем на Восточно-Европейской платформе. Это можно трактовать как существенно более слабое развитие (или даже отсутствие) астеносферного слоя под древней платформой.

Киргизский Тянь-Шань много лет является полигоном для геоэлектрических исследований, в настоящее время они проводятся под руководством А.К. Рыбина. Большой интерес представляют субмеридиональные профили МТЗ, пересекающие всю горно-складчатую

систему. Нами была выполнена сглаживающая 2D инверсия по трём профилям в сегменте, окружающем Иссик-Кульскую впадину. На всех профилях проявляются яркие коровые проводящие аномалии. В верхней коре они, по видимому, приурочены к глубинным флюидонасыщенным разломам, а обширная область в нижней коре, вероятнее всего, связана с дегидратацией горных пород на этих глубинах. Детальность результатов могла бы быть выше, если бы не существенные 3D искажения, характерные для горно-складчатых областей. Тем не менее, полученная информация о глубинных трещиноватых флюидонасыщенных зонах важна для изучения геодинамической активности.

Гарвальские Гималаи расположены на севере Индии. Благодаря сотрудничеству индийских и российских ученых (М. Израил, Е.Ю. Соколова), здесь получены качественные МТ данные по профилю от г. Рурки в долине Ганга до ледника Ганготри на высоте почти 4000 м. По результатам 2D инверсии под Гималаями однозначно выделяется коровая или даже корово-мантийная проводящая область, приуроченная к зоне погружения Индостанской плиты под Евразийскую, характеризующейся повышенной верхнекоровой и нижнекоровой сейсмичностью. Однако анализ МТ данных, прежде всего индукционных стрелок, свидетельствует о сильных 3D эффектах, которые снижают надёжность и детальность этих построений. Для их учёта нами была выполнена 3D инверсия, результаты которой подтвердили наличие неоднородностей в стороне от профиля, что также согласуется с априорными сведениями о наличии структур, ориентированных вкост Гималаев.

Каскадная зона субдукции представляет собой область погружения океанической микроплиты Хуан де Фука под Северо-Американскую плиту. Здесь в рамках проекта EMSLAB (руководитель – Дж. Букер) были выполнены МТ зондирования по профилю, пересекающему все береговые структуры, включая вулканическую дугу. Нами были выполнены анализ и интерпретация этих данных, включавшие несколько этапов, и завершившиеся этапом построения блочной 2D геоэлектрической модели. Для построения этой модели вначале была составлена стартовая модель, в которой были заданы фоновый океанический разрез по данным морской геоэлектрики, строение вулканогенно-осадочного чехла по итогам 1D подбора высокочастотных кривых, поверхность

субдуцирующей плиты по сейсмическим данным, частое разбиение на блоки в глубинной аномальной области по итогам сглаживающей 2D инверсии. Модель последовательно корректировалась с помощью процедур инверсии типпера, фазы продольного импеданса, поперечного импеданса, и затем на основе всех промежуточных результатов была составлена обобщённая модель. В ней присутствуют следующие проводящие структуры: погружающаяся верхняя флюидонасыщенная часть океанической плиты; погружающаяся океаническая частично расплавленная астеносфера; континентальная астеносфера; субвертикальная зона над ней, по которой расплавы внедряются в континентальную кору; нижнекоровый проводящий слой, возникающий вследствие дегидратации.

Глава 3 заканчивается разделом, в котором сформулированы задачи, решаемые глубинной магнитотеллурикой. Рассмотренные глубинные геоэлектрические модели разных регионов демонстрируют её возможности решать следующие задачи:

- в пределах древних платформ, выявлять протяжённые коровые аномалии, в основном обусловленные электропроводящими минералами в разделяющих блоки земной коры шовных зонах, и генетически связанные с месторождениями полезных ископаемых (Барятинская и Ладожская аномалии);

- в областях перехода от древних к молодым платформам, изучать их строение и определять разницу свойств земной коры и верхней мантии под древними и молодыми структурами (Транс-Европейская шовная зона);

- в зонах коллизии литосферных плит, оценивать флюидонасыщенность глубинных слоёв и разломов, оказывающую влияние на сейсмичность (Киргизский Тянь-Шань и Гарвальские Гималаи);

- в зонах субдукции, выявлять пути распространения флюидов и расплава в земной коре и верхней мантии, в том числе так же для лучшего понимания сейсмической активности (Каскадная зона субдукции).

Кроме того, необходимо отметить задачи изучения континентальных и океанических рифтовых зон, в которых также выявлены яркие глубинные проводящие аномалии.

Наконец, перспективна задача изучения пассивных континентальных окраин, в том числе в Арктике, для решения которой магнитотеллурика применялась ограничено.

Таким образом, глубинная магнитотеллурика эффективна при изучении аномалий электропроводности, связанных с особенностями строения, минерации и геодинамического состояния земной коры и верхней мантии древних платформ и их обрамления, зон коллизии и субдукции литосферных плит, континентальных и океанических рифтовых зон.

Глава 4. Примеры применения разведочной и малоглубинной геоэлектрики

В главе 4 обсуждаются возможности методов ЭМ зондирования при решении прикладных геологических задач: нефтегазовых, рудных, геотермальных, инженерно-гидрогеологических. Приводятся примеры результатов их решения, полученные при непосредственном участии автора.

Вкратце рассмотрена история применения методов ЭМ зондирования в области нефтегазовых исследований, которая долгое время была для них основной. Приводится пример выделения крупной нефтегазоперспективной структуры, предположительно погребенного прогиба, по результатам 2D инверсии МТ данных, полученных на региональном профиле вкост Кубанского прогиба. Другой пример демонстрирует выделение локальной антиклинальной структуры в осадочном чехле Русской плиты на основе подбора кривых МТЗ в рамках контрастной слоистой модели. Этот же подход использовался в другом районе Русской плиты на подземном хранилище газа (ПХГ), где наличие априорной информации позволило точно задать мощности слоев и выявить тонкую высокоомную линзу, связываемую с газонасыщением. Далее обсуждаются более высокие возможности по выявлению тонких высокоомных слоев, а также сопутствующих аномалий поляризуемости, методами ЭМ зондирования с заземленным источником, правда, при условии, что в разрезе нет других высокоомных слоев, что бывает нечасто.

Изучение рудных месторождений также всегда было ключевой областью применения ЭМ методов, хотя в течение большого периода это были простые

методы профилирования с искусственным источником. В настоящее время широко применяется метод АМТЗ, и в работе оценивается его чувствительность к проводящим рудным телам на примере обобщенной 3D геоэлектрической модели рудоносной интрузии. Далее рассмотрены методика и результаты 3D инверсии данных, измеренных по системе профилей на одном из месторождений Норильского рудного узла, здесь выявленные проводящие зоны хорошо коррелируют с рудоносным горизонтом по данным бурения. Другой пример демонстрирует способность АМТЗ оценить положение границ золотоносного кварцевого штокверка высокого сопротивления на месторождении Яно-Колымского металлогенического пояса. Далее кратко обсуждаются другие современные ЭМ методы рудной геофизики.

Ещё одной областью, в которой методы ЭМ зондирования играют ключевую роль, является изучение геотермальных ресурсов. В работе рассмотрены МТ исследования геотермальной зоны в Италии, где в метаморфическом основании выявлены пониженные сопротивления, увязываемые с трещиноватыми породами, насыщенными термальными водами. Другой пример относится к геотермальной зоне в Исландии, где выделяется два проводящих объекта, верхний связан с гидротермальной минерализацией с образованием глинистых минералов, а нижний, по-видимому, с частичным плавлением горных пород (работы в указанных двух регионах проводились по инициативе В.В. Спичака). Отдельно в работе обсуждаются перспективы применения ЭМ методов для изучения петротермальных ресурсов платформ на этапах региональных исследований, детальных изысканий и мониторинга в процессе эксплуатации.

Для решения инженерно-гидрогеологических задач методы ЭМ зондирования, в отличие от методов постоянного тока и геоэлектрохимических, применяются относительно недавно. В работе рассматривается применение методов малоглубинных ЧЗ, ЗС и АМТЗ при изысканиях под строительство железнодорожных тоннелей в Испании, основным результатом этих работ было выделение проводящих ослабленных зон в высокоомных скальных породах. Для поиска участков на бурение на воду в Греции нами применялся метод АМТЗ, здесь задача состояла в выделении перспективных пористых

относительно высокоомных известняков на фоне плотных мергелей пониженного сопротивления и хорошо проводящих глин и интрузий морской воды. ЭМ методы эффективны также при изучении многолетнемерзлых пород, этот вопрос кратко обсуждается в работе.

Глава 4 заканчивается разделом, посвящённым задачам, решаемым прикладной геоэлектрикой.

ЭМ зондирования успешно применяются при нефтегазовых исследованиях. Они позволяют изучать региональную структуру осадочных бассейнов, выделять перспективные структуры. Зондирования с гальваническим возбуждением при благоприятных геологических условиях, которые в основном встречаются на шельфе, дают возможность поиска и картирования залежей. При неблагоприятных для сейсморазведки условиях (траппы, соляные купола, складчатые зоны) ЭМ методы дают уникальную информацию. При наличии данных сейсморазведки и каротажа возможности интерпретации ЭМ данных резко возрастают за счёт использования априорной информации, при этом возможно выделение большого числа слоёв, оценка литологического состава и прогноз коллекторских свойств горных пород. Дополнительную информацию об ореолах вторичных изменений над залежами даёт оценка поляризационных параметров.

В рудной геофизике ЭМ методы играют ведущую роль, как на этапе прямого или косвенного поиска месторождений, так и на разведочном этапе для оконтуривания рудных тел и изучения геологического строения. Получаемые геоэлектрические разрезы отражают положение высокоомных интрузий, проводящих рудных тел, зон гидротермальных изменений, тектонических нарушений и т.д. Использование поляризационных параметров также расширяет возможности рудной электроразведки, в частности, позволяя разделить сульфидные руды и графитизированные породы.

В настоящей работе не затронута тема изучения нерудных твёрдых полезных ископаемых: индустриального сырья (алмаз, графит, слюды, флюорит...), химического и агрономического сырья (апатиты, фосфориты, минеральные соли, самородная сера...), строительных материалов (песок, глина, известняк, магматические и метаморфические породы...), а также угля и

горючих сланцев. ЭМ методы находят ограниченное применение при их поиске и разведке, особенно много примеров касается поиска кимберлитовых трубок.

Большую роль играют ЭМ зондирования при изучении геотермальных ресурсов. Они позволяют выделять трещиноватые водонасыщенные зоны в скальных породах, области развития гидротермальной минерализации и частичного плавления горных пород. По мере расширения территорий эксплуатации геотермальных ресурсов в районы с более низкими глубинными температурами контрастные аномалии флюидной и геотермической природы пропадают, но ЭМ зондирования по-прежнему дают полезную информацию о геоэлектрическом строении района.

В малоглубинной геофизике, решающей задачи в области инженерной геологии, гидрогеологии, геокриологии, геоэкологии, почвоведения, изучения техногенных и археологических объектов, доминируют методы постоянного тока. Низкочастотные ЭМ методы в основном используются при изысканиях под строительство глубокозалегающих тоннелей, изучении глубоких горизонтов подземных вод, картировании подошвы многолетнемерзлых пород. Но в последние годы метод РМТЗ и малоглубинные модификации методов ЗСБ и ЧЗ находят применение во всех перечисленных областях.

Таким образом, ЭМ зондирования успешно применяются при поиске и разведке месторождений углеводородов на суше и на шельфе, рудных и других твёрдых полезных ископаемых, при изучении геотермальных зон и решении малоглубинных задач.

Заключение

Полученные результаты и выводы сформулированы выше в общей характеристике работы в разделах «научная новизна», «практическая значимость» и «защищаемые положения». Систематизация всех частных результатов представлена в таблицах 1 и 2, где представлены, соответственно, обобщённые геоэлектрические модели и конкретные геологические объекты, рассмотренные в работе. В таблице 3 приведён полный список геологических объектов, изучаемых с помощью ЭМ зондирований, и отмечено, какие из них

затронуты в работе с точки зрения теоретических модельных исследований и/или практической интерпретации наблюдаемых данных.

Таким образом, что современная методика интерпретации данных МТ и других ЭМ зондирований позволяет с высокой степени детальности решать самые разнообразные фундаментальные и прикладные задачи, от изучения глубоких горизонтов земной коры и верхней мантии до поиска и разведки месторождений полезных ископаемых и решения задач инженерной геофизики.

№	Моделируемый объект	ЭМ метод, размерность модели	Основной вывод по результатам анализа/инверсии синтетических данных
1	Массив скальных пород с ослабленными зонами	МТЗ, 3D	Ослабленные зоны могут быть локализованы 3D инверсией МТ данных с одиночного профиля, при условии включения фонового слоистого разреза в априорную модель
2	Геотермальная зона с обводненной областью	МТЗ, 3D	Чувствительность МТ данных к обводнённой зоне в метаморфическом основании определяется наличием её гальванической связи с осадочным чехлом
3	Геотермальная зона с гидротермальными изменениями	МТЗ, 3D	Область гидротермальных изменений хорошо определяется 1D инверсией, но искажается образ глубинной области плавления, здесь необходима 2D инверсия
4	Гранитная интрузия с рудными телами	МТЗ, 3D	Проводящие рудные тела создают существенную аномалию в МТ данных, если их горизонтальный размер в 2 раза превышает глубину залегания
5	Месторождение углеводородов на шельфе	ЗС, 1D	Высокоомный 25-метровый слой проявляется на кривых ЗС при глубине залегания до 2 км, поляризованный 25-метровый слой – при глубине залегания до 150 м
6	Платформенный чехол с высокоомными слоями	ЧЗ, 2D	Промежуточные высокоомные слои экранируют электрическую компоненту поля, при наличии разрыва в этих слоях эффект экранирования пропадает
7	Коровые 2D проводящие зоны под 3D осадочной впадиной	МТЗ, 3D	При 2D инверсии данных осадочный чехол наилучшим образом восстанавливается по поперечному импедансу, аномалии в консолидированной коре – по типперу
8	Анизотропные коровые проводящие зоны	МТЗ, 2D	Анизотропия коровых проводящих зон может быть оценена по МТ данным только в случае, если их горизонтальный размер многократно превышает глубину залегания
9	Зона субдукции андского типа	МТЗ, 2D	ТМ мода даёт информацию о гальванической связи океанического и континентального коровых проводников, ТЕ мода – о континентальной астеносфере

Таблица 1. Обобщённые геоэлектрические модели, рассмотренные в работе.

№	Объект исследования	Примеры в работе	Максимальные глубины (м)
1	Массив скальных пород	- Провинция Куэнка (Испания)	200
2	Месторождение подземных вод	- Район Истмия (Греция)	400
3	Рудное месторождение	- Участок Норильского рудного узла - Участок Яно-Колымского пояса	1 500
4	Геотермальное месторождение	- Геотермальная зона Травале (Италия) - Геотермальная зона Хенгил (Исландия)	3 000
5	Нефтегазоперспективная структура	- Краснодарский край, региональная стр-ра - Кировская область, локальная стр-ра - Рязанская область, ПХГ	5 000
6	Коровая аномалия в стабильном регионе	- Барятинская аномалия - Ладожская аномалия - Транс-Европейская шовная зона	40 000
7	Коровая аномалия в активном регионе	- Киргизский Тянь-Шань - Гарвальские Гималаи - Каскадная зона субдукции	40 000
8	Астеносфера	- Транс-Европейская шовная зона - Каскадная зона субдукции	200 000

Таблица 2. Геологические объекты исследований ЭМ методами, рассмотренные в работе

№	Геологические объекты исследований низкочастотными ЭМ методами	Проведены теоретические модельные исследования	Выполнена интерпретация наблюденных данных
1	Массивы скальных пород, содержащих проводящие ослабленные зоны	+	+
2	Месторождения подземных вод - коллектора, ограниченные непроницаемыми пластами		+
3	Многолетнемерзлые горные породы		
4	Рудные месторождения, включающие проводящие рудные тела, высокоомные зоны окварцевания и др.	+	+
5	Месторождения нерудных полезных ископаемых		
6	Геотермальные месторождения с низкоомными зонами водонасыщения, минерализации и плавления	+	+
7	Нефтегазоперспективные структуры и высокоомные аномалии в осадочном чехле	+	+
8	Коровые аномалии древних платформ преимущественно электропроводящей природы	+	+
9	Коровые аномалии горно-складчатых областей преимущественно ионопроводящей природы	+	+
10	Астеносфера как проводящий горизонтально-неоднородный слой в верхней мантии	+	+

*Таблица 3. Полный список геологических объектов исследований
низкочастотными ЭМ методами.*

**Основные публикации автора по теме диссертации
в рекомендуемых ВАК изданиях и в иностранных журналах**

1. Куликов В.А., **Пушкарев П.Ю.**, Яковлев А.Г., Яковлев А.Д. Опыт частотных электромагнитных зондирований на Русской плите // Известия вузов (Геология и разведка), 1999, № 3, с. 106-114.

2. Хмелевской В.К., Яковлев А.Г., Модин И.Н., **Пушкарев П.Ю.**, Казурова Н.Р. Комплексные электромагнитные исследования в Калужской области при проведении учебно-производственных геофизических практик // Вестник Московского Университета, Серия 4 (Геология), 1999, № 5, с. 64-68.

3. Новожинский К., **Пушкарев П.Ю.** Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных // Физика Земли, 2001, № 6, с. 72-85.

4. Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., **Пушкарев П.Ю.**, Романюк Т.В. Геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны // Физика Земли, 2002, № 10, с. 23-53.

5. Алексанова Е.Д., Куликов В.А., **Пушкарев П.Ю.**, Яковлев А.Г. Использование полей электрифицированных железных дорог при проведении электромагнитных зондирований // Известия вузов (Геология и разведка), 2003, № 4, с. 60-64.

6. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С., Мерщикова Н.А., **Пушкарев П.Ю.** Магнитовариационное зондирование: новые возможности // Физика Земли, 2003, № 9, с. 3-30.

7. Бердичевский М.Н., Яковлев А.Г., Алексанова Е.Д., Андреева Е.В., Бубнов В.П., Куликов В.А., Морозова А.Г., **Пушкарев П.Ю.**, Яковлев Д.В. Технология и результаты региональных магнитотеллурических исследований // Разведка и охрана недр, 2004, № 5, с. 37-40.

8. Berdichevsky M.N. and **Pushkarev P.Yu.** Are the crustal and mantle conductive zones isotropic or anisotropic? // Acta Geophysica, 2006, Vol. 54, No. 4, pp. 333-342.

9. Bubnov V.P., Yakovlev A.G., Aleksanova E.D., Yakovlev D.V., Berdichevsky M.N., **Pushkarev P.Yu.** Magnetotelluric studies of the East-European Craton and adjacent regions // *Acta Geophysica*, 2007, Vol. 55, No. 2, pp. 154-168.

10. **Pushkarev P.Yu.**, Ernst T., Jankowski J., Jozwiak W., Lewandowski M., Nowozynski K., Semenov V.Yu. Deep resistivity structure of the Trans-European suture zone in Central Poland // *Geophysical Journal International*, 2007, Vol. 169, pp. 926-940.

11. Зыков Ю.Д., Кошурников А.В., **Пушкарев П.Ю.** Применение частотного электромагнитного зондирования при проектировании газопроводов // *Инженерные изыскания*, 2008, № 3, с. 70-74.

12. Semenov V., Pek J., Adam A., Jozwiak W., Ladanivskyy B., Logvinov I., **Pushkarev P.**, Vozar J. and Experimental Team of CEMES. Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project // *Acta Geophysica*, 2008, Vol. 56, No. 4, pp. 957-981.

13. Кошурников А.В., Зыков Ю.Д., **Пушкарев П.Ю.**, Хасанов И.М. Электромагнитные исследования при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне // *Разведка и охрана недр*, 2008, № 12, с. 25-26.

14. Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов Ив.М., Рыбин А.К., Баглаенко Н.В., Баталев В.Ю., Голубцова Н.С., Матюков В.Е., **Пушкарев П.Ю.** Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных данных вдоль геотраверса Нарын // *Физика Земли*, 2010, № 8, с. 36-53.

15. Бердичевский М.Н., Голубцова Н.С., Варенцов Ив.М., **Пушкарев П.Ю.**, Рыбин А.К., Соколова Е.Ю. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: последовательная инверсия магнитовариационных и магнитотеллурических данных вдоль профиля Нарын // *Физика Земли*, 2010, № 8, с. 54-61.

16. Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Верещагина М.И., Куликов В.А., **Пушкарев П.Ю.**, Соколова Е.Ю., Шустов Н.Л., Хмелевской В.К., Яковлев А.Г. Электромагнитные зондирования осадочного чехла и консолидированной земной коры в зоне перехода от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе: проблемы и перспективы // *Физика Земли*, 2010, № 8, с. 62-71.

17.Иванов П.В., **Пушкарев П.Ю.** Возможности интерпретации магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле, при изучении трехмерно-неоднородной среды // Физика Земли, 2010, № 9, с. 3-10.

18.Хмелевской В.К., Петрухин Б.П., **Пушкарев П.Ю.** Магнитотеллурика и радиоволновые интерференционные зондирования // Физика Земли, 2010, № 9, с. 11-14.

19.Иванов П.В., Алексеев Д.А., Бобачев А.А., **Пушкарев П.Ю.**, Яковлев А.Г. О комплексировании методов вертикального электрического зондирования и зондирования становлением поля в ближней зоне // Инженерные изыскания, 2011, № 11, с. 42-51.

20.Шустов Н.Л., Куликов В.А., Мойланен Е.В., Паленов А.Ю., **Пушкарев П.Ю.**, Хмелевской В.К., Яковлев А.Г. Создание геофизической обсерватории на Александровской базе геофизических практик геологического факультета МГУ (Калужская область) // Вестник Московского Университета, Серия 4 (Геология), 2012, № 4, с. 44-48.

21.Амирагов А.С., Иванов П.В., **Пушкарев П.Ю.**, Суконкин С.Я. Развитие методики интерпретации данных магнитотеллурического зондирования геологических структур // Вестник Удмуртского университета, Серия «Биология и Науки о Земле», 2012, выпуск 3, с. 97-103.

22.Иванов П.В., **Пушкарев П.Ю.** Трёхмерная инверсия рассчитанных на одиночном профиле магнитотеллурических данных // Физика Земли, 2012, № 11-12, с. 91-96.

23.Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Логвинов И.М., Лозовский И.Н., **Пушкарев П.Ю.**, Соколова Е.Ю., Тарасов В.Н., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика, 2013, № 2, с. 32-38.

24.Мойланен Е.В., **Пушкарев П.Ю.**, Шустов Н.Л. Предварительные результаты глубинного магнитотеллурического зондирования на геофизической базе МГУ в Калужской области // Записки Горного института, 2013, том 200, с. 65-70.

25. **Пушкарев П.Ю.**, Хмелевской В.К., Бойченко Д.А., Голубцова Н.С., Иванова К.А., Слепых К.С., Хуторской М.Д. Магнитотеллурические исследования геотермальных ресурсов // Геофизика, 2014, № 4, с. 2-7.

26. Moilanen J., **Pushkarev P.Yu.** Induction sounding of the Earth's mantle at a new Russian geophysical observatory // Acta Geophysica, 2015, Vol. 63, No. 2, pp. 385-397.

27. Рыбин А.К., **Пушкарев П.Ю.**, Паленов А.Ю., Иванова К.А., Мансуров А.Н., Матюков В.Е. Новые геофизические данные о глубинной структуре межгорных впадин Тянь-Шаня // Вестник МГУ, серия 4 «Геология», 2015, № 1, с. 63-69.

28. 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.

29. Кошурников А.В., Тумской В.Е., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Гунар А.Ю., **Пушкарев П.Ю.**, Семилетов И.П., Кошурников А.А. Первый опыт электромагнитного зондирования для картирования кровли подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук, 2016, том 469, № 5, с. 616-620.

Патенты на изобретения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство № 2006610012 об официальной регистрации программы для ЭВМ “EM1D”. Автор: **Пушкарев П.Ю.** Роспатент, Москва, 10.01.2006.

2. Патент № 2280269 на изобретение «Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления». Авторы: **Пушкарев П.Ю.**, Кошурников А.В., Джалилов Ф.Ф., Кириаков В.Х. Роспатент, Москва, 20.06.2006.

3. Свидетельство № 2010610763 об официальной регистрации программы для ЭВМ “Faraday”. Авторы: **Пушкарев П.Ю.**, Куприянов И.С. Роспатент, Москва, 22.01.2010.

4. Патент № 2435180 на изобретение «Подводная геофизическая станция». Авторы: Суконкин С.Я., Рыбаков Н.П., Белов С.В., Червинчук С.Ю., Кошурников А.В., **Пушкарев П.Ю.**, Чернявец В.В. Роспатент, Москва, 07.04.2010.