

На правах рукописи



АНТОНОВ Евгений Юрьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ И МАГНИТНЫХ СРЕДАХ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

*диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Файнберг Эдуард Борисович

доктор физико-математических наук

Филатов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор

Шурина Элла Петровна

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск)

Защита состоится «15» сентября 2011 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, в конференц-зале.

Адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090.

Тел.: (383) 333 21 30, Факс: (383) 333 25 13,

E-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН

Автореферат разослан « » 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. геол.-мин. наук, доцент

Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – математические модели квазистационарных электромагнитных полей в слабонеоднородных, диспергирующих (по электропроводности или магнитной проницаемости), а также в сильнопроводящих магнитных средах при решении прямых и обратных задач импульсных электромагнитных зондирований.

Актуальность. Импульсные электромагнитные зондирования - одно из наиболее динамично развивающихся направлений разведочной геофизики. За его более чем полувековую историю достигнуты значительные успехи при поисках и разведке залежей углеводородов, рудных месторождений, гидротермальных резервуаров и решении задач гидрогеологии. В последние два десятилетия импульсные зондирования нашли применение для изучения верхней части геологического разреза, при решении геоэкологических задач, при поисках невзорвавшихся боеприпасов и в археологии. При этом проектирование установок и интерпретация выполнялись преимущественно на основе модели слоисто-однородной геологической среды. В рамках этой модели были решены многие практические и научные задачи. В настоящее время усилия специалистов сосредоточены на развитии теории метода и разработке программно-алгоритмических средств для решения прямых и обратных задач с учётом анизотропии, а также двух- или трёхмерного распределения электропроводности.

Однако в области одномерного математического моделирования электромагнитных полей в одномерных средах существуют важные и даже принципиальные проблемы, по разным причинам не привлекавшие к себе должного внимания. Прежде всего, речь идёт об учёте влияния эффектов электрической и магнитной вызванной поляризации горных пород на результаты нестационарных электромагнитных зондирований. До сих пор отсутствуют *систематические* исследования проявлений этих эффектов даже применительно к слоисто-однородным средам.

В тех случаях, когда поляризационные эффекты рассматриваются как геологические помехи, необходима методика измерений, минимизирующая их влияние. Если же поляризуемость среды представляет самостоятельный интерес, то необходима такая методика, которая, с одной стороны, делает эти эффекты максимальными, а с другой – позволяет получать данные, на основе которых можно выполнить достоверную инверсию. При этом для создания эффективных процедур решения обратных задач необходимы исследования по разработке новых подходов, в частности, совместной инверсии данных многоразностных зондирований. Положение усугубляется тем, что недостаточно выяснены возможности и самой инверсии.

Очевидно, успешное продвижение в обозначенных областях должно базироваться на эффективном решении соответствующих прямых и обрат-

ных задач. По существу, речь идет о расширении модельной базы метода с использованием информации о вызванной электрической и магнитной поляризации.

Такое расширение возможно и на основе иного подхода. В наземной геоэлектрике одномерная модель обычно ассоциируется с горизонтально-слоистой средой. В скважинной геофизике используются и другие одномерные модели, среди которых особый интерес представляет цилиндрически-слоистая среда с аксиально-симметрично расположенными индуктивным источником и приёмной рамкой малых размеров. На таких моделях основаны исследования повреждений и мониторинг обсадных колонн нефтегазовых скважин. В этом случае необходим учёт высокого контраста как по электропроводности, так и магнитной проницаемости ферромагнитной стальной обсадной колонны.

Существует большой класс структур в земной коре (например, положительные и отрицательные структуры фундамента, пологозалегающие рудные тела и т.п.), которые могут быть описаны квазислоистыми моделями со слабо возмущёнными границами. Хотя поверхности таких границ слабо негоризонтальны, эти отклонения могут оказывать значительное влияние на измеряемый сигнал, особенно в поляризующихся средах.

В связи с вышесказанным представляются **актуальными** расширение модельной базы, разработка и совершенствование алгоритмов и программ для решения прямых и обратных задач импульсных электромагнитных зондирований в квазислоистых и слоисто-однородных средах, с учётом реальной конфигурации и размеров систем возбуждения-измерения, а также частотной дисперсии их электрических и магнитных характеристик.

Цель исследования - расширение модельной базы и повышение геологической информативности импульсных электромагнитных зондирований на основе теоретических и экспериментальных исследований переходных процессов в электропроводящих и магнитных слоисто-однородных и квазислоистых средах, с учётом эффектов электрической и магнитной вызванной поляризации.

Научные задачи

1. Разработать алгоритмы и программы для решения прямых задач импульсных электромагнитных зондирований в горизонтально-слоистых средах с учётом частотной зависимости их удельной электропроводности и магнитной проницаемости, а также в цилиндрически-слоистых проводящих магнитных средах.

2. На основе метода возмущений разработать средства быстрого приближённого математического моделирования импульсных электромагнитных полей в проводящих поляризующихся средах со слабо-искривлёнными границами.

3. Выполнить инверсию данных импульсных индуктивных и гальванических зондирований в классе моделей слоисто-однородных поляризующихся сред с использованием разработанных программно-алгоритмические средств и методик.

4. Исследовать влияние магнитной вязкости на измеряемые сигналы при импульсных электромагнитных зондированиях и разработать эффективные средства инверсии данных.

5. Разработать систему автоматизированной интерпретации данных неразрушающего электромагнитного контроля технического состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин.

Фактический материал и методы исследования Основной метод исследования - *математическое моделирование* устанавливающих электромагнитных полей в слоисто-однородных диспергирующих средах. При разработке алгоритмов решения прямых и обратных задач и программных средств для их реализации использовались методы и приёмы вычислительной и прикладной математики: интегрирование сильно-осциллирующих слабозатухающих функций с применением специальных квадратур; статистический анализ данных измерений, решение интегральных уравнений на основе метода возмущений и процедуры снесения граничных условий; использование процедур линейной и нелинейной минимизации при решении обратных задач; постоянный контроль погрешностей численных решений и обязательное внутреннее и доступное внешнее тестирование программ.

При проектировании аппаратуры электромагнитного контроля технического состоянием обсадных колонн применялось *физическое моделирование* (лабораторные измерения электромагнитных характеристик ферромагнитных образцов и материалов, переходных характеристик тестовых объектов).

Для проверки теоретических и практических рекомендаций, полученных на основе математического моделирования, а также для тестирования разработанного программного обеспечения были выполнены *полевые и натурные эксперименты* (отработка методик по разделению электродинамических и поляризационных процессов; измерения в тестовых и эксплуатационных скважинах для испытаний аппаратуры и отработки методики электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн). Экспериментальное изучение магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания выполнено на одном из участков в Западной Якутии. Исследование влияния вызванной поляризации на переходные характеристики индукционной и гальванической установок выполнялось в Новосибирской области и Горном Алтае. Компьютерная система для интерпретации данных электромагнитного контроля технического состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин использовалась при испытаниях дефек-

тоскопа на нефтяных скважинах ОАО «Сургутнефтегаз» и скважинах ЗАО «Нижневартовскгеофизика» (2001-2002 гг.). При выполнении физического моделирования, натурных экспериментов и полевых измерений использовалась аппаратура для регистрации переходных процессов в наземном варианте (Импульс-Ц, Цикл, SGS-TEM, Fast-Snap) и скважинный вариант аппаратуры для электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн ЭМДС «Луч», разработанный в Институте нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения РАН и Научно-производственном предприятии геофизической аппаратуры «Луч».

Защищаемые научные результаты и положения:

1. Алгоритмы и программы для решения прямых и обратных задач метода импульсных электромагнитных зондирований в поляризующихся, магнитовязких, магнитных слоисто-однородных и квазислоистых средах с учётом реальных размеров систем «возбуждения–регистрации».

2. Алгоритмы и программы автоматизированной интерпретации данных электромагнитного неразрушающего контроля технического состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин, основанные на решении прямых и обратных задач электромагнитных зондирований в проводящих ферромагнитных материалах.

3. Эффективными средствами сужения областей эквивалентности и получения достоверных решений при изучении слоисто-однородных проводящих поляризующихся сред являются зондирования однотипными установками разных размеров, зондирования с использованием индуктивных и гальванических установок, а также совместная инверсия всего комплекса полученных данных.

4. При зондировании поляризующегося полупространства параллельной гальванической установкой для любого разноса существует такое положение приёмной линии, при котором влияние вызванной поляризации ослаблено. Это даёт возможность двухэтапного решения обратной задачи: сначала только для индукционной, а затем - поляризационной составляющих сигнала.

5. В диапазоне значений удельной электропроводности, характерных для горных пород, процессы релаксации намагничённости и затухания вихревых токов являются практически независимыми, что позволяет рассчитывать их переходные характеристики на основе принципа суперпозиции. Поскольку при изучении магнитной вязкости нельзя воспользоваться электромагнитным зондированием, основанном на скин-эффекте, для определения её вертикального распределения необходимо использовать многообразные установки (геометрические зондирования).

Научная новизна и личный вклад. Представленные в диссертационной работе научные результаты получены лично соискателем.

Разработаны алгоритмы и программы для решения прямых задач импульсной электроразведки в слоисто-однородных и слабо неоднородных средах с учётом зависимости удельной электропроводности или магнитной проницаемости от времени/частоты. Среди новых компонент программ, разработанных соискателем, важными являются процедуры расчёта и хранения квадратурных коэффициентов, позволяющие моделировать электромагнитные сигналы в системах возбуждения-измерения сложной геометрии, а также процедуры учёта временных характеристик токовых импульсов.

На основе теории возмущений построено первое приближение для трёхмерной задачи – моделирования электромагнитных полей на слабо-искривлённой границе проводящих поляризующихся сред. Исследованы возможности импульсных электромагнитных зондирований при решении структурных задач с помощью гальванических и индуктивных установок. Показано, что при индукционном возбуждении трехмерной структуры возникает электрическая мода, порождаемая либо эффективным электрическим квадруполем (эпицентральное положение генераторного контура), либо эффективным электрическим диполем (смещённое от эпицентра неоднородности положение источника). При гальваническом возбуждении среды отклик, регистрируемый в электрической линии, также характеризуется преобладающим влиянием электрической моды, которая включает дополнительный сигнал от зарядов слоя, индуцируемых вертикальной составляющей напряженности электрического поля.

Разработаны теоретические и практические рекомендации по совместной инверсии данных импульсных зондирований поляризующихся геологических сред, основанные на применении генераторных контуров разных размеров или совместных зондированиях с использованием индукционных и гальванических установок.

Предложен способ гальванических импульсных зондирований поляризующихся сред параллельной установкой, позволяющий ослаблять влияние вызванной поляризации специальным выбором взаимного положения питающей и приёмной линий.

Средствами математического моделирования доказан факт независимости составляющих переходного процесса в магнитовязкой среде: индукционного, связанного с затуханием вихревых токов, и релаксационного магнитного, обусловленного затуханием наведённой намагниченности.

Для электромагнитной дефектоскопии обсадных ферромагнитных колонн разработан программно-алгоритмический комплекс. Он объединяет два подхода, обеспечивающих высокую точность решения прямой задачи во всём временном диапазоне переходного процесса. Для моделирования ранней стадии переходного процесса используется решение в частотной области с последующим переходом во временную область посредством

преобразования Фурье. Для поздних времён переходного процесса строится решение во временной области по методу А.Н. Тихонова, основанное на редукции краевой задачи к проблеме собственных значений для задачи Штурма-Лиувилля. В программной реализации решения предложен способ хранения собственных значений и собственных функций, снижающий время вычислений.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Итогом систематических исследований влияния эффектов вызванной электрической и магнитной поляризации горных пород на результаты импульсных электромагнитных зондирований стало расширение модельной базы метода и повышение его геологической информативности; теоретическое обоснование решений прямой и обратной задач в горизонтально-слоистых средах с учётом вызванной электрической и магнитной поляризации; необходимость учёта конкретных размеров установок возбуждения-регистрации при моделировании откликов от поляризующихся геологических сред и недостаточность дипольного приближения; разработка эффективных средств инверсии переходных характеристик с учётом вызванной поляризации и магнитной вязкости; система автоматизированной интерпретации данных неразрушающего электромагнитного контроля технического состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин.

Программно-алгоритмический комплекс «Купол», созданный для решения прямых задач импульсных электромагнитных зондирований, внедрён и используется для моделирования сигналов в поляризующихся средах, содержащих пологие структуры, во ФГУНППГ «Иркутскгеофизика», в Иркутском электроразведочном предприятии (ИЭРП), в Иркутском государственном техническом университете. Программы для моделирования переходных процессов в слоисто-однородных поляризующихся средах внедрены в подразделениях ИЭРП. Интерпретационные системы для обработки данных индукционных нестационарных зондирований - в подразделениях наземной электроразведки НПП ГА «Луч» и Ботуобинской ПГРЭ (ЗАО АЛРОСА). Система интерпретации данных импульсных электромагнитных зондирований гальванической установкой для дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ) применяется в Сибирской геофизической научно-производственной компании. В НПП ГА «Луч» используется компьютерная система для интерпретации данных электромагнитной дефектоскопии обсадных колонн нефтегазовых скважин.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на 16 международных, 7 всесоюзных и всероссийских конференциях, а также на семинарах в ведущих научно-исследовательских организациях: ФГУНППГ «Иркутскгеофизика»,

ФГУП СНИИГГиМС, НПП ГА «Луч», Институт геофизики и метеорологии (Кёльнский университет, Германия, 2004, 2006).

Они изложены в 32 публикациях: в их числе 1 монография (в соавторстве с М.И. Эповым и Г.М. Морозовой), 23 статьи в российских и зарубежных научных журналах (из них 22 - в ведущих научных рецензируемых журналах из перечня ВАК), 8 публикаций в трудах и материалах научных конференций.

Работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Исследования проводились в соответствии с планами НИР Института по программам фундаментальных исследований СО РАН: на 1991-1995 гг. (№ 3.1.1.03), на 1996-2000 гг. (№ 3.1.15.5), на 1998-2000 гг. (гос. рег. № 01980003021), на 2001-2003 гг. (гос. рег. № 01200101571), на 2004-2006 г. (№ 28.7.2). Исследования поддерживались грантами: Минвуза № 3Н-230-48, РФФИ № 01-05-65064, № 04-05-64413, № 06-05-64215, № 07-05-00305, № 07-05-00663, № 09-05-12047-офи_м, № 10-05-00263, НАТО (совместно с Институтом геофизики и метеорологии Кёльского университета, Германия, 2004-2006 гг.); интеграционными проектами Отделения наук о Земле РАН № 7.5, № 7.6, междисциплинарным фундаментальных исследований СО РАН № 26.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения и включает 354 страницы текста, 125 рисунков и 42 таблицы; библиография содержит 249 наименований.

Благодарности. Автор благодарен коллегам по лабораториям электромагнитных полей, геоэлектрики и скважинной геоэлектрики: Ю.Н. Антонову, В.Н. Глинских, Ю.А. Дашевскому, И.Н. Ельцову, Н.О. Кожевникову, И.Г. Кузину, А.К. Манштейну, С.В. Мартакову, В.С. Могилатову, Г.М. Морозовой, Н.Н. Неведровой, М.Н. Никитенко, Е.В. Павлову, А.Е. Плотникову, В.В. Потапову, В.П. Соколову, К.В. Сухоруковой, А.Б. Черякуе, С.В. Шатрову, А.Н. Шеину, Э.П. Шуриной за содержательные обсуждения и помощь при выполнении работы; В.И. Самойловой - за консультации и полезные рекомендации по оформлению диссертации.

Автор благодарен руководству Научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры «Луч» в лице генерального директора К.Н. Каюрова, исполнительного директора В.Н. Ерёмину, директора по производству В.Т. Лаврухова, заместителя генерального директора по науке Э.Е. Лукьянова - за постоянную поддержку и предоставленные возможности в практической реализации научных результатов.

Неоценимую помощь в подборе фактического материала и внедрении программных и методических разработок в производство оказали

Ю.А. Агафонов, С.М. Бабушкин, А.Г. Дмитриев, П.Ю. Легейдо, А.В. Поспеев, В.Н. Рыбакин, Т. Hanstain, S. Helwig, Chr. Ölsner, B. Tezkan.

Автор благодарен Ю.А. Дашевскому, Н.О. Кожевникову, В.С. Могилатову, Н.Н. Неведровой, В.В. Плоткину и М.И. Эпову, ознакомившимся с работой и сделавшим полезные замечания и рекомендации.

Автор глубоко признателен своим учителям д.т.н., профессору Л.А. Табаровскому и д.т.н., профессору, академику РАН М.И. Эпову, оказавшим большое влияние на формирование научных взглядов соискателя, за всестороннюю поддержку и постоянное внимание на протяжении многих лет совместной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении поставлены цели и задачи, обоснована актуальность исследования, перечислены выносимые на защиту результаты, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы. Введение и начальные разделы глав содержат анализ научных публикаций, относящихся к предмету исследований.

Глава 1. Прямые задачи импульсной электроразведки в диспергирующих слоисто-однородных средах

Начальный этап разработки метода зондирования становлением электромагнитного поля в СССР связан с работами А.Н. Тихонова, С.М. Шейнмана, Б.С. Эненштейна, О.А. Скугаревской, Д.Н. Четаева, В.М. Давыдова, В.И. Дмитриева и других исследователей. Первые наземные измерения переходных процессов были выполнены Б.С. Эненштейном, Н.П. Владимировым и др. В конце 50-х годов прошлого столетия во ВНИИГеофизике (Л.Л. Ваньян, Л.З. Бобровников и др.) был разработан новый метод структурной электроразведки, основанный на изучении поздней стадии переходного процесса - зондирование становлением поля в дальней зоне (ЗСД).

Важным событием для создания метода в его современном виде стала работа В.А. Сидорова и В.В. Тикшаева [1969], в которой был предложен и экспериментально реализован новый способ электроразведки для индукционных установок - зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Большое значение при этом имели работы Ф.М. Каменецкого и П.П. Фролова, содержавшие теоретические предпосылки для создания метода.

Значительный вклад в развитие теоретической части метода ЗСБ принадлежит учёным московской (Ф.М. Каменецкий, П.П. Макагонов, Б.С. Светов, Ю.В. Якубовский), саратовской (В.П. Губатенко, В.Ю. Задорожная, В.А. Сидоров, В.В. Тикшаев), а также новосибирской школ электромагнитных исследований, сотрудниками ИГиГ СО АН СССР

и СНИИГГиМС (А.А. Кауфман, Г.М. Морозова, Л.А. Табаровский, М.И. Эпов, М.М. Гольдман, Г.А. Исаев, В.С. Могилатов, В.С. Моисеев, Б.И. Рабинович, Г.М. Тригубович, В.В. Филатов и др.). В развитии метода ЗС участвовали и зарубежные геофизики: W.L. Anderson, L. Buselli, N.B. Christensen, F.M. Flis, G.W. Hohman, A. Hoerdt, G. Keller, T. Lee, M. Nabighian, G.A. Newman, A. Raiche, R. Smith, B. Spies, C.H. Stoyer, K.-M. Strack, K. Vosoff, J. Wait, P. Weidelt, G. West и др.

Дальнейшее развитие метода связано как с аппаратными разработками, так и с автоматизацией процесса интерпретации. В России за последние десятилетия создано несколько серий современной электроразведочной аппаратуры для работ методом становления поля: Импульс, Код, Строб, Цикл, Fast-Snap, SGS-TEM, TEM-Fast (Б.П. Балашов, П.О. Барсуков, А.Б. Великин, Б.М. Глинский, С.М. Стефаненко, Г.М. Тригубович, Э.Б. Файнберг). За рубежом разработкой подобных приборов занимаются компании: AEMR, Geonics Ltd., SIRO, Zonge и др.

Среди создателей современных алгоритмов и программно-алгоритмических средств для метода ЗСБ и его модификаций наиболее известны В.А. Друскин, Л.А. Книжнерман, В.С. Могилатов, Л.Ф. Московская, А.А. Петров, В.П. Соколов, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, Л.А. Табаровский, Э.П. Шурина, М.И. Эпов, А.Р. Raiche, P. Weidelt и др.

Проблемами электромагнитных методов в частотно-дисперсионных (поляризующихся) средах занимались Г.В. Астраханцев, В.В. Агеев, Ю.П. Булашевич, Ф.М. Каменецкий, В.А. Комаров, А.В. Куликов, П.Ю. Легейдо, А.Н. Мезенцев, В.С. Моисеев, Н.Г. Полетаева, А.Ф. Постельников, А.А. Рыжов, Б.С. Светов, В.А. Сидоров, В.В. Филатов, Д.А. Фридрихсберг, Е.А. Шемякин.

Эффекты, обусловленные явлением магнитной поляризации горных пород (суперпарамагнетизм), рассматривали в своих работах П.О. Барсуков, А.К. Захаркин, Ф.М. Каменецкий, Н.О. Кожевников, Э.Б. Файнберг, В.В. Филатов, T. Lee, G. Buselli, B. Spies.

Модель слоисто-однородной среды является базовой при теоретико-методических исследованиях в наземной геоэлектрике. Несмотря на постоянное совершенствование средств математического моделирования электромагнитных полей в латерально-неоднородных средах, возможности этой модели далеко не исчерпаны. В её рамках выделяются два основных направления для развития электромагнитных исследований земной коры. Первое из них связано с учётом сложного пространственного распределения электропроводности σ , магнитной μ или диэлектрической ε проницаемостей среды. Оно развивается по пути разработки быстрых приближённых способов вычислений и создания средств точного решения краевых задач. Второе направление сохраняет как основу слоистые среды (го-

горизонтальную или цилиндрическую), обычно их параметры σ, μ, ε являются анизотропными, или зависящими от времени/частоты.

Исследование горизонтально- и цилиндрически-слоистых сред необходимо продолжать в силу того, что кроме пространственно неоднородных существуют недостаточно изученные и слабо обеспеченные программно-алгоритмически модели слоистых поляризующихся и магнитовязких сред. По существу к этой же категории относится задача неразрушающего контроля обсадных колонн.

В первой главе рассмотрены вопросы разработки средств математического моделирования нестационарных электромагнитных полей в слоисто-однородных средах с учётом низкочастотной дисперсии удельного электрического сопротивления/проводимости (УЭС/УЭП) или магнитной проницаемости, а также конечных размеров установок возбуждения-регистрации и параметров токовых импульсов.

Основные результаты главы 1

1.1. В первом разделе представлена вычислительная схема решения прямых задач для произвольного источника в слоисто-однородных проводящих средах, когда удельная электропроводность или магнитная проницаемость являются комплексными функциями, зависящими от частоты. Практическая реализация алгоритмов имела особенности, связанные с выбором:

- набора пространственных и циклических частот при построении квадратурных коэффициентов для преобразования Ханкеля и последующего перехода из частотной области во временную;
- оптимальных способов интерполяции и интегрирования квадратурных коэффициентов при учёте конечных размеров измерительных установок;
- способов вычисления электрической и магнитной мод полного поля в зависимости от формы токового импульса.

Алгоритмы реализованы в пакете программ решения прямых задач для поляризующихся, магнитных и магнитовязких слоисто-однородных сред, возбуждаемых импульсными источниками и приёмниками с произвольной геометрией.

1.2. В наземной электроразведке используются измерительные установки, составными элементами которых являются либо заземлённые электрические линии, либо незаземлённые петли. В разделе представлены специальные алгоритмы и процедуры для расчёта полей в установках произвольной пространственной конфигурации на основе интегрирования квадратурных коэффициентов для дипольных систем.

1.3. Дисперсия электрических свойств горных пород обусловлена причинами электрохимического и электрофизического происхождения. При изучении вызванной поляризации используется феноменологический

подход, позволяющий описывать это явление, не вдаваясь в механизм его генерации на микроуровне.

Алгоритм расчёта электромагнитного поля учитывает эффект вызванной поляризации посредством введения комплексного УЭС $\rho^*(\omega)$ при решении электродинамической гармонической задачи. Наиболее известным и часто применяемым представлением частотной характеристики УЭС/УЭП является модель [Cole, Cole, 1941]:

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}, \quad \sigma^*(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где индекс 0 использован для обозначения УЭС/УЭП на постоянном токе.

Наряду с электрической, некоторые геологические объекты характеризуются и магнитной вызванной поляризацией, проявляющейся в виде медленных релаксационных процессов намагничивания горных пород. Общий подход к математическому моделированию электромагнитных полей в магнитовязких средах аналогичен описанному выше способу учёта эффектов вызванной поляризации. Измерения в гармоническом режиме, показали, что магнитная восприимчивость сред с магнитной вязкостью является комплексной и частотно-зависимой [Worm, 1999]. В работах [Трухин, 1973; Lee, 1984; Fannin, Charles, 1995] приводится выражение, описывающее аналитическую зависимость магнитной проницаемости от частоты ω , начальной магнитной восприимчивости κ_0 , минимального τ_1 и максимального τ_2 значений времени релаксации:

$$\mu^*(\omega) = \mu_0 \left\langle 1 + \kappa_0 \left\{ 1 - \frac{\ln[(1 + i\omega\tau_2)/(1 + i\omega\tau_1)]}{\ln(\tau_2 / \tau_1)} \right\} \right\rangle.$$

Эта зависимость использована в разработанных алгоритмах и программах.

1.4. В разделе представлены результаты численного анализа электромагнитных полей, исходя из того, что при расчёте откликов проводящих, поляризующихся и магнитовязких сред важно учитывать размеры элементов генераторно-измерительных систем. Для доказательства этого приводятся примеры ошибок, связанных с игнорированием этого фактора.

Существенным признаком слоистых поляризующихся сред, проявляющимся на кривых временного спада сигнала, оказывается его сильная зависимость от геометрии установки. Причина этой чувствительности обусловлена пространственной структурой поля в поляризующихся средах. Использование дипольного приближения становится корректным на большем удалении от источника, нежели в случае проводящей неполяризующейся среды. Как видно из рис. 1, в магнитовязких средах чувствитель-

ность к параметрам измерительной системы может проявляться во всем интервале времен регистрации сигнала.

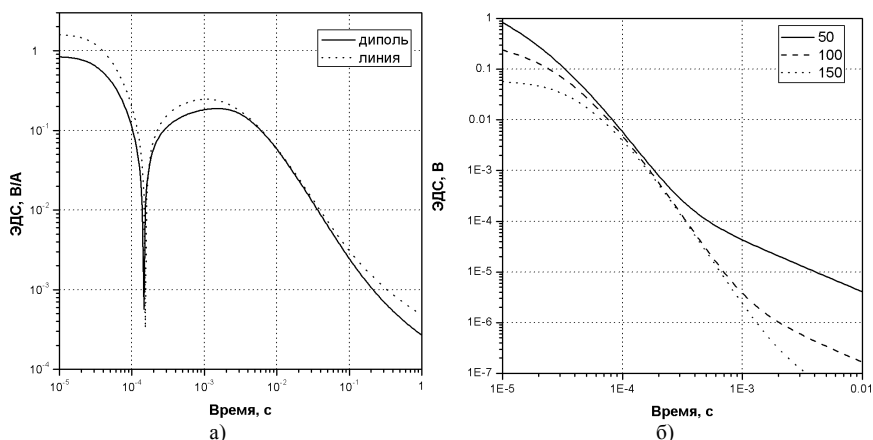


Рис. 1. Численное моделирование откликов для среды с погружённым поларизующимся слоем: а) сопоставление дипольного приближения и установки конечных размеров; б) отклики магнитовязкой среды для установок с эквивалентным моментом и разными размерами генераторных петель (шифр кривых - длина стороны генераторной петли, м).

Глава 2. Приближённый способ математического моделирования электромагнитных полей в квазислоистых средах

Даже при использовании экономичных конечно-разностных алгоритмов и гибридных схем математическое моделирование нестационарных полей в средах со сложной геологической структурой требует больших вычислительных ресурсов. В этой ситуации становится актуальным приближенное математическое моделирование, основанное на адекватной замене одной модели другой, менее сложной, что упрощает и ускоряет вычисления. В связи с этим рассмотрены модели, содержащие слабые возмущения плоских границ, разделяющих слои разной электропроводности, а также границ, представленных тонкими слоями с интегральной продольной проводимостью S или поперечным сопротивлением T (для краткости, P -, S - или T -плоскости, соответственно). Гармонические электромагнитные поля в подобных моделях ранее изучались *методом снесённых граничных условий* (Г.Г. Обухов, В.М. Давыдов, В.И. Дмитриев, А.А. Кауфман, Л.А. Табаровский, С.М. Шейнманн, Е.Л. Фейнберг). Процедура снесения граничных условий была получена как первое приближение при решении интегрального уравнения (малые параметры – амплитуда и наклон структуры).

Основные результаты главы 2

2.1. В первом разделе главы на основе метода интегральных уравнений дано строгое обоснование феноменологического метода снесения граничных условий. Построено первое приближение для трёхмерной задачи определения электромагнитного поля, порождаемого слабоискривлённым проводящим тонким пластом.

2.2. Дано физическое истолкование полей вспомогательных источников, аппроксимирующих влияние искривленных границ.

Таблица 1

S-слой		
Источник	Обозначение	Плотность
I_x	P_{S1}	$(\sigma_{\nu-1} - \sigma_\nu) \beta f_\nu E_{\nu,x}^{(0)} + i\omega\mu S \beta f_\nu H_{\eta,y}^{(0)} + S \frac{\partial}{\partial x} (\beta f_\nu E_{\eta,z}^{(0)})$
I_y	P_{S2}	$(\sigma_{\nu-1} - \sigma_\nu) \beta f_\nu E_{\nu,y}^{(0)} + i\omega\mu S \beta f_\nu H_{\eta,x}^{(0)} + S \frac{\partial}{\partial y} (\beta f_\nu E_{\eta,z}^{(0)})$
I_z	P_{S3}	$\beta f_\nu (E_{\nu,z}^{(0)} - E_{\nu-1,z}^{(0)}) \sigma_\nu \sigma_{\nu-1} / \sigma_\eta$
M_x	P_{S4}	$-S \beta f_\nu E_{\nu,y}^{(0)}$
M_y	P_{S5}	$-S \beta f_\nu E_{\nu,x}^{(0)}$
T-слой		
I_x	P_{T1}	$\beta f_\nu (\sigma_{\nu-1} E_{\nu-1,x}^{(0)} - \sigma_\nu E_{\nu,x}^{(0)})$
I_y	P_{T2}	$\beta f_\nu (\sigma_{\nu-1} E_{\nu-1,y}^{(0)} - \sigma_\nu E_{\nu,y}^{(0)})$
I_z	P_{T3}	$\beta \sigma_\nu T_\nu \sigma_{\nu-1} (f'_x E_{\nu,x}^{(0)} + f'_y E_{\nu,y}^{(0)} - f_\nu \partial E_{\nu,z}^{(0)} / \partial z) - \beta \sigma_\nu f_\nu (E_{\nu-1,z}^{(0)} - E_{\nu,z}^{(0)})$

В табл. 1 приведены плотности эффективных вспомогательных источников, имитирующих слабое искривление тонких проводящих S- или изолирующих T-слоев, а также простых контактов между средами (формулы для простого контакта получаются при $S \equiv T \equiv 0$). Здесь I_x, I_y, I_z и M_x, M_y - моменты электрических и магнитных диполей, ориентированных по осям x, y, z ; β - амплитуда структуры, заданной функцией $f_\nu(x, y)$, $\max_{(x,y) \in R^2} f_\nu(x, y) = 1$; ν - номер искривленной границы; индекс $\eta = \{\nu - 1, \beta > 0; \nu, \beta < 0\}$.

Искривление простых границ и T -слоёв аппроксимируется простым токовым (диполи I_x, I_y) и двойным зарядовым (диполь $-I_z$) слоями. Для описания поля от искривленного S - слоя требуется дополнительно ввести двойной токовый слой (диполи M_x, M_y табл. 1). Снесение граничных условий дает в первом приближении разрывы горизонтальных компонент поля, согласующиеся с данными табл. 1. Согласование основано на том, что скачок касательной к границе компоненты магнитного поля порождается простым токовым слоем, а скачок электрического поля - двойным токовым и двойным зарядовым слоями.

2.3. Для слагаемых, описывающих поля в первом приближении, получены следующие интегральные представления.

$$S\text{- слой: } \Phi_N^{(1)}(P_0) = \int_{\Sigma_0} \left\{ P_{S1}^{I_x} \varphi_N + P_{S2}^{I_y} \varphi_N + P_{S3}^{I_z} \varphi_N + P_{S4}^{M_x} \varphi_N + P_{S5}^{M_y} \varphi_N \right\} dS,$$

$$T\text{- слой: } \Phi_N^{(1)}(P_0) = \int_{\Sigma_0} \left\{ P_{T1}^{I_x} \varphi_N + P_{T2}^{I_y} \varphi_N + P_{T3}^{I_z} \varphi_N \right\} dS.$$

Здесь $\Phi = E \vee H$, Σ_0 - горизонтальная (спрямлённая) граница; $^Q\varphi_N$ - N - компонента электрического или магнитного поля источника типа Q , расположенного на поверхности Σ_0 .

2.4. В разделе исследована модовая структура аномального поля, порождаемая слабо искривлёнными границами. Поскольку эффективные источники аномального поля можно описать электрическими и магнитными диполями, расположенными на границах горизонтально-слоистой среды, аномальные поля во всем пространстве допускают разделение на дебаевские моды. Подробно исследована модовая структура поля, порождаемого распределёнными на плоской границе горизонтальными электрическими диполями.

2.5. На примере модели двухслойной горизонтально-слоистой среды с локальным поднятием в её основании исследованы системы зарядов, возникающих на крыльях куполообразной структуры

$$f(x, y) = \beta e^{-x^2/\tau_x^2 - y^2/\tau_y^2}, \text{ при различных положениях возбуждающего}$$

магнитного диполя. Установлено, что при эпицентрльном возбуждении структуры вертикальным магнитным диполем её отклик аппроксимируется

$$\text{электрическим квадруполем с моментом } d = \frac{\partial E_\varphi^0}{\partial r} \frac{3\beta(\tau_x^2 - \tau_y^2)\tau_x\tau_y k}{8}.$$

$k = (\sigma_i - \sigma_e) / (\sigma_i + \sigma_e)$ - коэффициент контрастности, σ_i, σ_e - проводимости слоёв, имеющих возмущённую границу, E_φ^0 - прямое поле.

При смещённом положении источника отклик структуры аппроксимируется эффективным электрическим диполем, момент которого равен $d = \beta \tau_x \tau_y E_x^0 k / 2$.

2.6. Выяснены физические особенности образования нестационарных аномальных полей от пологих трёхмерных структур. Показано, что при индукционном возбуждении трёхмерной структуры возникает электрическая мода, порождаемая либо эффективным электрическим квадруполем (эпицентральное положение генераторной петли), либо эффективным электрическим диполем (смещённое от эпицентра неоднородности положение источника). При наличии боковых влияний (смещённый источник) интерпретация нестационарного электрического поля в рамках слоистой модели среды приводит к «появлению» ложных проводящих или изолирующих слоев.

2.7. Средствами приближённого численного моделирования исследованы квазистационарные электромагнитные поля от малоамплитудных пологих поляризующихся структур, встречающихся в нефтегазоносных районах. Проанализированы чувствительности сигналов в гальванических системах измерения к параметрам, определяющим частотную зависимость комплексного удельного электрического сопротивления. В рассмотренных моделях исследуемый объект представлялся как поляризующееся включение с УЭС в области высоких частот, равным УЭС вмещающей среды. В такой постановке интегральные представления позволили исследовать именно эффект вызванной поляризации малоамплитудной структуры.

2.8. Исследованы возможности выделения погружённых, слабых (на фоне суммарной проводимости разреза) слоёв при индукционном возбуждении. Анализ выполнялся с целью выявления указанных объектов на кривых кажущейся продольной проводимости. Установлено, что электрическая поляризация маломощных погружённых пропластков выражается на трансформантах $S_\tau(H_\tau)$ понижением, а в случае магнитной вязкости – повышением суммарной проводимости. Однако эти изменения невелики и не могут считаться характерными признаками.

Слабонаклонные границы при профилировании установкой «петля-линия» проявляются на кривых $S_\tau(H_\tau)$ в виде нарушений монотонности и могут выглядеть как уменьшение суммарной продольной проводимости с глубиной.

Глава 3. Инверсия данных нестационарных электромагнитных зондирований с учётом вызванной поляризации

Вызванная электрическая поляризация (ВП) горных пород является важной электрофизической характеристикой, используемой при решении

задач рудной и нефтяной геофизики, гидрогеологии, геоэкологии, а в последние 10 лет – при исследованиях криолитозоны. Библиография на эту тему очень обширна. С появлением метода ВП, вплоть до 1960-1970 гг., изучение вызванной поляризации осуществлялось с использованием заземлённых электрических линий. Индукционные эффекты при таких измерениях рассматривались как помеха. Вследствие этого измерения выполнялись на поздних временах (в традиционном методе ВП это 0.1-1 с после выключения тока в питающей линии) [Комаров, 1980].

С конца 70-х годов в публикациях результатов съёмок индукционным методом переходных процессов (МПП) появляются сведения о регистрации немонотонных (вплоть до смены полярности) неустановившихся сигналов [Spies, 1980; Молчанов и др., 1984; Рыжов, 1985; Мезенцев, 1985, 1990; Walker, Kawasaki, 1988]. Как выяснилось, причиной их появления является быстро устанавливающаяся индукционно вызванная поляризация (ВПИ) геологической среды [Сидоров, Яхин, 1979; Lee, 1981; Weidelt, 1983; Молчанов, Сидоров, 1985; Flis et al., 1989]. Далее началась разработка теории метода переходных процессов с учётом этого явления. Сначала была предложена приближённая теория ВПИ [Сидоров, Яхин, 1979; Каменецкий и др., 1984, 1990; Каменецкий, Тимофеев, 1984, 1992]. На её основе были выполнены оценочные расчёты, позволившие получить представление о том, как быстропротекающая ВП влияет на индукционные переходные процессы.

Для более полного изучения проявлений индукционно-вызванной поляризации и возможностей их использования в электроразведке представлялась актуальной разработка алгоритмических и программных средств для решения прямых и обратных задач импульсных электромагнитных зондирований слоисто-однородных поляризующихся сред. Этой задаче посвящена третья глава диссертации.

Основные результаты главы 3

3.1. Представлены результаты численного эксперимента, заключавшегося в инверсии данных зондирований для оценки возможностей и ограничений импульсной индуктивной электроразведки при изучении поляризуемости на примере однородного поляризующегося полупространства. Для компьютерного эксперимента были выбраны значения электромагнитных параметров, соответствующие мёрзлым ионно-проводящим породам. При съёмках методом переходных процессов в северных районах страны зарегистрировано очень большое число немонотонных переходных процессов, свидетельствующих о влиянии быстропротекающей ВПИ. Существование индукционно-вызванной поляризации подтверждено полевыми и лабораторными измерениями с гальваническими установками [Кожевников и др., 1995; Карасёв и др., 2004].

Численный эксперимент был направлен на решение двух задач:

- составить представление о погрешностях определения параметров однородного поляризующегося полупространства по индукционным переходным характеристикам установки с фиксированной геометрией;

- средствами математического моделирования оценить эффективность совместной инверсии данных, полученных с установками разных размеров.

В обоих случаях исследования включали: 1) выбор моделей и установок; 2) расчет искусственно зашумлённых синтетических переходных характеристик; 3) инверсию данных; 4) анализ результатов. Каждая из задач решалась поэтапно: 1 – инверсия без априорной информации об исходных моделях, 2 – при наличии некоторой априорной информации. Инверсия показала, что при небольших значениях поляризуемости η и/или показателя степени s формулы Коул-Коул псевдоэкспериментальные переходные характеристики можно объяснить на основе модели горизонтально-слоистой проводящей неполяризующейся среды. При возрастании η и/или s влияние поляризуемости становится очевидным даже при отсутствии априорной информации.

3.2. Цель описанного в этом разделе численного эксперимента заключалась в оценке средствами математического моделирования эффективности *совместной инверсии* данных, полученных с установками разных размеров при изучении проводящего поляризующегося полупространства. На основе набора моделей для двух установок были рассчитаны индукционные переходные характеристики, на которые были наложены мультипликативная помеха и аддитивный шум. Для этих псевдоэкспериментальных данных была выполнена раздельная и совместная инверсия без априорной информации об исходных моделях. Затем - инверсия с учётом того, что исходная модель является однородным поляризующимся полупространством. Хотя некоторые из моделей, полученных в результате инверсии, сильно отличаются от истинных, более чем в половине случаев эти модели – даже при использовании установки одного размера и отсутствии априорной информации – дают *верное представление* о геоэлектрическом разрезе. Учёт априорной информации позволяет существенно приблизиться к параметрам исходной модели. В большинстве случаев совместная инверсия данных двух установок разного размера «сдвигает» структуру и параметры моделей, найденных независимо для каждой установки, по направлению к исходной модели.

3.3. Подобно тому, как среди множества геоэлектрических моделей особую роль играет однородное полупространство, среди моделей горизонтально-слоистых сред особое место занимает двухслойная. Такая модель позволяет ответить на некоторые принципиальные вопросы, связанные с наличием границ, и в то же время является достаточно простой поскольку описывается небольшим набором параметров. Вследствие этого

результаты решения прямых и обратных задач для такой модели сравнительно легко поддаются анализу и обобщению.

Средствами компьютерного эксперимента исследованы возможности и ограничения процедуры инверсии индукционных переходных характеристик для двух моделей: 1) поляризующегося слоя, подстилаемого неполяризующимся основанием; 2) неполяризующегося слоя, перекрывающего поляризующееся основание. Показано, что для модели 1 даже при отсутствии априорной информации значения найденных поляризационных параметров (поляризуемости, постоянной времени и показателя степени) близки к истинным. Для модели 2 при отсутствии априорной информации возникают трудности с определением того, какой слой является поляризующимся, а поляризационные параметры определяются с большими ошибками. Для обеих моделей мощность слоя, а также удельное электрическое сопротивление слоя и основания определяются с незначительными погрешностями независимо от того, с учётом или без учёта априорной информации была выполнена инверсия. При увеличении мощности слоя его параметры, найденные в результате инверсии, все меньше отклоняются от истинных. По отношению к параметрам основания наблюдается обратная картина: погрешность их определения возрастает при увеличении мощности слоя. Как правило, совместная инверсия по сравнению с раздельной улучшает результат, т.е. параметры, найденные путем совместной инверсии, оказываются ближе к истинным. Среднеквадратичное относительное расхождение экспериментальных и теоретических переходных характеристик ($\sigma_{\text{отн}}$) по данным совместной инверсии в несколько раз превосходит полученные в результате раздельной инверсии. Отсюда следует, что наряду с величиной $\sigma_{\text{отн}}$ для оценки качества инверсии могут оказаться полезными дополнительные критерии.

3.4. Нестационарные электромагнитные зондирования установками гальванического типа нередко содержат в отклике составляющую, порождаемую вызванной поляризацией (ВП) пород. Использование именно гальванических систем измерения привело к созданию метода вызванной поляризации, который показал свою высокую эффективность при решении рудных и нефтегазовых задач.

В настоящее время на практике успешно реализована технология, получившая название дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ). Она основана на том, что в поздней стадии переходного процесса отклик в неполяризующейся проводящей слоистой среде не зависит от разноса. Поэтому в разностном (пространственно дифференцированном) сигнале аннулируется индукционная и подчёркивается поляризационная составляющая отклика среды [Рыхлинский и др., 1970; Мандельбаум и др., 1988; Легейдо, и др., 1990]. Для успешной интерпретации данных импульсных электромагнитных зондирований с учётом вызванной

поляризации важно знание параметров модели проводящего разреза (без поляризации).

Индукционные и гальванические системы измерения обладают различной чувствительностью к процессам вызванной поляризации. Очевидно, что данное свойство может быть использовано для повышения достоверности интерпретации гальванических измерений. Поэтому эффективность интерпретации данных зондирований гальванической установкой с учётом ВП может быть увеличена путём использования данных индуктивных зондирований при построении стартовой модели для проводящего неполяризующегося разреза.

Рассмотрено нестационарное электрическое поле и способ конфигурирования установки, позволяющий минимизировать поляризационную составляющую измеряемого сигнала в установке с параллельными горизонтальными электрическими линиями. Выбор именно такой измерительной системы основан на моделировании измерений на площади всех компонент электрического и магнитного полей, возбуждаемых в поляризующейся среде электрической линией. Вычислялась также чувствительность каждой из составляющих векторов электрического и магнитного полей к ВП, а также характерные особенности их распределения на дневной поверхности. При зондировании поляризующегося полупространства с использованием такой установки для каждого фиксированного разнеса существует положение приёмной линии, при котором влияние ВП ослаблено. Таким образом, появляется возможность восстановления параметров проводящего разреза за счёт использования *метода пространственного разделения* поляризационной и индукционной составляющих сигнала.

Расчёты координат точек с ослабленными проявлениями ВП позволили заметить ограничения методики. Так, в модели, содержащей два различных поляризующихся слоя, геометрического ослабления эффектов ВП становится недостаточно. Несмотря на приведённые ограничения для отыскания параметров референтной неполяризующейся среды окрестность границы между монотонными и знакопеременными сигналами является лучшей областью для размещения приёмных линий (по сравнению с традиционными расположениями элементов установки).

Благоприятными для применения методики являются геоэлектрические разрезы, описываемые моделями: поляризующегося полупространства; поляризующегося слоя, подстилаемого проводящим полупространством; погруженного поляризующегося слоя; поляризующегося полупространства, перекрытого проводящим слоем.

Это подтверждено полевыми экспериментами (рис. 2). Измерения проводились на двух объектах: 1) глиняный карьер в окрестностях г. Новосибирска; 2) берег Обского водохранилища в 5 км от пос. Верх-Ирмень Новосибирской области. Сплошные линии на рис. 2 (а) 31° , б)

28,25°) соответствуют азимутальным углам установок со слабой чувствительностью к вызванной поляризации среды.

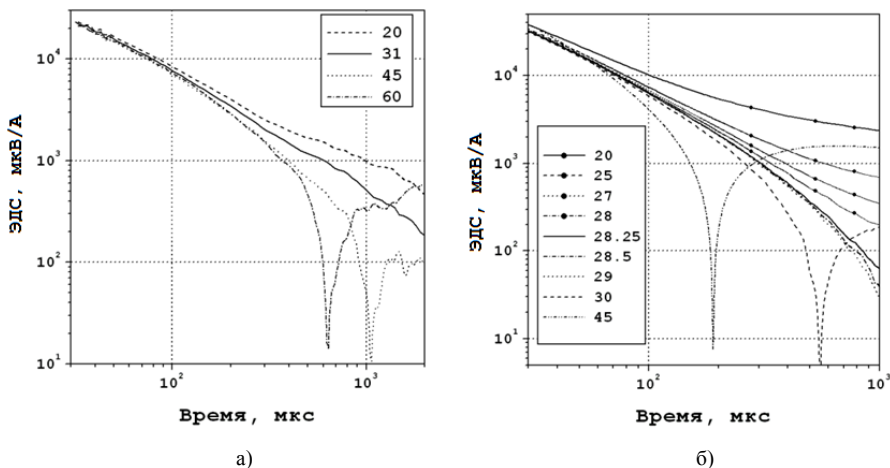


Рис. 2. Экспериментальные переходные характеристики. Шифр кривых - азимутальный угол установки (град.), а) глиняный карьер, б) пос. Верх-Ирмень.

Глава 4. Численный анализ переходных процессов в магнитовязких средах

В горных породах проявление магнитной вязкости связано с релаксацией намагниченности ультрадисперсных частиц ферримагнитных минералов (суперпарамагнетизмом). В большинстве случаев при проведении геофизических съёмок методами импульсной индуктивной электроразведки, составляющая отклика среды, обусловленная магнитной вязкостью, незначительна по сравнению с индуцированной вихревыми токами. Однако существуют природные и антропогенные объекты, концентрация суперпарамагнитных частиц в которых настолько значительна, что влияние магнитной вязкости становится заметной или даже превосходящей влияние вихревых токов. При исследовании таких объектов методами импульсной индуктивной электроразведки эффектом магнитной вязкости уже нельзя пренебречь.

Зачастую проявление магнитной вязкости рассматривалось как геологическая помеха, затрудняющая интерпретацию результатов индуктивной электроразведки в терминах «нормальной» электропроводности [Buselli, 1982; Lee, 1984; Захаркин и др., 1988; Dabas, Skinner, 1993; Захаркин, Бубнов, 1995; Pasion et al., 2002]. Однако, результаты других исследований свидетельствуют, что обнаруживаемые при измерениях индуктивными методами эффекты магнитной вязкости отражают важные особенности

генезиса и строения геологических сред, а также происходящих в верхних горизонтах земной коры геологических процессов [Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Kozhevnikov, Nikiforov, 1996; Барсуков, Файнберг, 1997, 2002; Кожевников и др., 1998; Кожевников, Никифоров, 1999; Kozhevnikov et al., 2001, 2003].

В этой связи актуальны, во-первых, разработка методических рекомендаций по увеличению или ослаблению влияния магнитной вязкости; во-вторых, создание методики оценки пространственного распределения магнитной вязкости верхних горизонтов земной коры; в-третьих, развитие методики петрофизической интерпретации результатов таких съёмок. Для решения поставленной проблемы наряду с лабораторными и полевыми экспериментами необходимы средства математического моделирования индукционных переходных процессов с учётом магнитной вязкости.

Давая характеристику тому, что уже сделано по части математического моделирования, следует отметить работы Т. Ли [1984a, b], который получил и исследовал аналитические выражения, описывающие ЭДС переходного процесса в суперпарамагнитном проводящем полупространстве и тонком суперпарамагнитном слое, перекрывающем проводящее немагнитное основание. Как следует из этих работ, при использовании совмещённой установки магнитная вязкость проявляется сильнее, чем при измерениях в установке с соосными петлями. Т. Ли показал также, что переходная ЭДС в совмещённой установке зависит не только от размеров петли, но и от сечения провода.

В последнее десятилетие интерес к проявлениям магнитной вязкости в импульсной индуктивной электроразведке проявился также в связи с проблемой обнаружения и диагностики неразорвавшихся боеприпасов.

В целом же о математическом моделировании индукционных переходных процессов в суперпарамагнитных средах известно немного. Это обстоятельство препятствует обоснованию эффективной методики полевых съёмок МПП в районах, где присутствуют магнитовязкие геологические объекты, а также тому, чтобы перевести магнитную вязкость в разряд свойств, определяемых в результате инверсии данных МПП.

Основные результаты главы 4

4.1. Изучены основные особенности переходных процессов, возбуждаемых петлевыми установками в однородном проводящем и магнитовязком полупространстве.

Рассмотрены два способа расчета переходных характеристик. Первый основан на связи вязкой намагниченности и создаваемым ею магнитным потоком, пронизывающим приемную петлю. В основу второго положено решение краевой задачи для уравнения Гельмгольца методом разделения переменных с учётом зависимости магнитной проницаемости от частоты.

Первый способ имеет аналитическое выражение и позволил верифицировать решение электродинамической задачи в полной постановке.

Хотя переходные характеристики сложным образом зависят от геометрии установки и параметров среды, можно выделить некоторые закономерности, полезные на этапе проектирования работ и при интерпретации.

При использовании установок с измерительной петлей, вынесенной за пределы генераторной, суперпозиция сигналов, обусловленных релаксацией намагниченности и диффузией вихревых токов, приводит к смене полярности переходной характеристики. Это смена полярности наблюдается после более раннего по времени изменения знака ЭДС, обусловленного исключительно диффузией вихревых токов.

Если для измерения устанавливаемого магнитного поля используется одновитковая петля, то в *совмещенной установке по сравнению с соосной уровень сигнала выше*. Это является недостатком совмещенной установки, когда объектом исследования является распределение удельного электрического сопротивления, и преимуществом в том случае, если необходимо изучить магнитную вязкость.

4.2. Приводятся результаты расчётов переходных характеристик для установок с горизонтальными незаземленными петлями в двухслойных средах, одна из которых (модель 1) представлена магнитовязким слоем на немагнитном основании, а другая (модель 2) – магнитовязким основанием, перекрытым немагнитным слоем. Эффективным способом представления результатов является использование зависимости измеряемой ЭДС от мощности слоя в фиксированный момент времени. В случае двухслойной модели среды ЭДС нормируется на сигнал на поверхности однородного полупространства с параметрами слоя (модель 1) или основания (модель 2). При небольшой мощности магнитовязкого слоя её увеличение приводит к возрастанию сигнала. Если мощность слоя сравнима или превосходит размер генераторной петли, влияние слоя неотлично от создаваемого однородным магнитовязким полупространством. Для модели с магнитовязким основанием при малой толщине немагнитного слоя значения сигнала не отличаются от измеряемых на поверхности однородного магнитовязкого полупространства. При погружении основания на глубину свыше 15-20% от размера генераторной петли сигнал начинает уменьшаться, сначала незначительно, а затем все быстрее.

Так же, как и в случае однородного полупространства, установлено, что в двухслойных средах совмещенная установка более чувствительна к эффекту магнитной вязкости, чем эквивалентная ей по моменту, соосная установка. Это является её недостатком, если объектом исследования является распределение УЭП, и преимуществом при изучении магнитной вязкости.

4.3. В результате сравнительного анализа результатов математического моделирования переходных характеристик установок «петля в петле» и совмещенной в присутствии магнитовязкого пласта, расположенного в немагнитной среде установлено следующее.

Для совмещенной установки независимо от мощности h_2 пласта наблюдается экспоненциальное убывание ЭДС (на фиксированной временной задержке) при увеличении глубины h_1 до его кровли или – если пласт залегает на поверхности – высоты расположения установки. Когда измерения проводят установкой «петля в петле», картина меняется. Если пласт тонкий, при увеличении h_1 ЭДС возрастает, достигает максимума и затем убывает. Чем тоньше пласт, тем отчетливее выражен максимум. В присутствии пласта большой мощности наблюдается монотонное убывание сигнала с увеличением глубины залегания пласта или высоты расположения установки. Для обеих установок увеличение мощности пласта приводит к росту ЭДС – сначала быстрому, а потом все более медленному. При больших значениях h_2 эффект пласта становится неотличимым от создаваемого магнитовязким полупространством.

Отмеченные особенности переходных характеристик необходимо учитывать при проектировании и проведении съёмок методом переходных процессов, а также геологической интерпретации их результатов, если на территории работ встречаются слои с магнитной вязкостью.

При значениях УЭП, характерных для геологических сред, процессы релаксации намагниченности и диффузии вихревых токов являются независимыми. Это позволяет рассчитывать переходные характеристики магнитовязких проводящих сред на основе принципа суперпозиции. С другой стороны, независимость этих процессов является причиной того, что по отношению к магнитной вязкости принцип электромагнитного зондирования не работает. Поэтому для изучения вертикального распределения магнитной вязкости необходимо использовать геометрические зондирования.

4.4. Геометрические зондирования с целью изучения магнитной вязкости проведены на западе Якутии и на севере Бурятии. Инверсия выполнялась в рамках модели горизонтально-слоистой среды с дисперсией магнитной восприимчивости.

Результат инверсии представлен на рис. 3, где показаны переходные характеристики, измеренные в Западной Якутии в 30 км западнее г. Мирный [Стогний В.В. и др., 2010]. Проявления магнитной вязкости связаны здесь с туфами основного состава. При выбросе туфового материала в атмосферу происходило его быстрое остывание, поэтому кристаллизация частиц ферромагнитных минералов заканчивалась, когда их размеры были настолько малы, что многие частицы являются суперпарамагнитными. Установка состояла из генераторной петли (25×25 м) и индукционного

датчика с эффективной площадью 400 м^2 , ток – 12 А. Расстояния между центрами генераторной петли и датчика составляли 0, 18, 23 и 28 м.

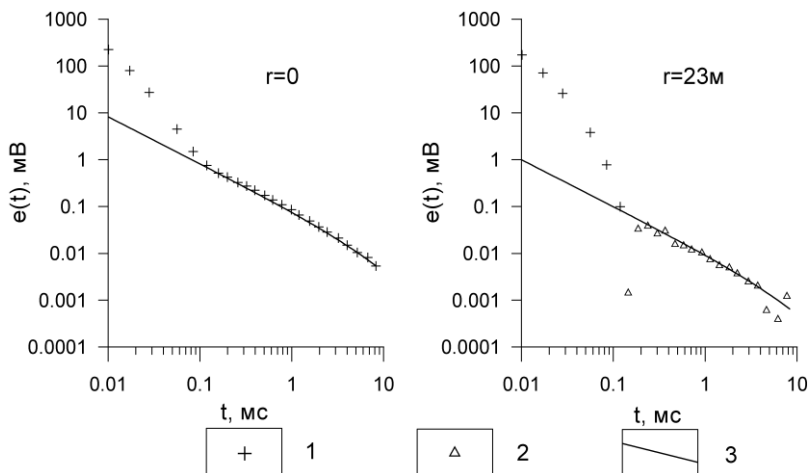


Рис. 3. Результат автоматической совместной инверсии многоразностного зондирования МПП. 1, 2 – измеренная ЭДС: 1 – положительной, 2 – отрицательной полярности; 3 – синтетическая ЭДС.

Согласно результатам инверсии, геологическая среда в центре аномального участка описывается моделью трехслойной среды с промежуточным магнитовязким слоем. Его мощность составляет $40 \div 100 \text{ м}$, статическая магнитная восприимчивость $\kappa = 2.6 \div 3.2 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Модель согласуется с априорной информацией о геологическом строении участка работ и, возможно, уточняет его.

На основе предположения, что суперпарамагнитные частицы представлены мельчайшими зернами магнетита, была сделана оценка их объёмного содержания. Объёмная магнитная восприимчивость суперпарамагнитного зерна магнетита составляет 230 ед. СИ. Поделив на эту величину, найденную в результате инверсии, значение магнитной восприимчивости ($\kappa = 3 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ), находим, что объёмное содержание магнетита в промежуточном слое составляет $1.3 \cdot 10^{-4}$ или 0.013%. Весовое содержание ультрадисперсных частиц – с учётом плотностей магнетита $\approx 4.7 \text{ г/см}^3$ и туфов $\approx 2 \text{ г/см}^3$ – около 0.03%. Эти оценки свидетельствуют о возможности использования метода переходных процессов для обнаружения *in situ* и оценки содержания суперпарамагнитных частиц в трапповых формациях.

Глава 5. Инверсия данных электромагнитного контроля обсадных колонн нефтегазовых скважин

Контроль за техническим состоянием обсадных колонн нефтегазовых скважин - одна из актуальных задач промысловой геофизики. Для её решения разработаны и применяются различные методы. Одним из эффективных является метод переходных процессов. Среди введённых в практику следует отметить метод электромагнитной дефектоскопии и толщинометрии (ЭМДСТ) [Климов и др., 1988; Климов, 1996, 2008; Сидоров, 1996, 1998; Теплухин и др., 1998, 2001, 2006; Ткаченко, Калташев, 2002; Теплухин, 2009]. Вместе с тем, опыт его применения выявил трудности в распознавании дефектов, обусловленных механическими или химическими повреждениями, а также связанными с изменением физических свойств материала колонны. Основными направлениями повышения эффективности и совершенствования метода электромагнитной дефектоскопии являются дальнейшее развитие теоретической, методической и аппаратной составляющих. Это предполагает, во-первых, решение электродинамических задач в ферромагнитных проводниках, численный анализ которых позволит не только изучить влияние параметров колонн на измеряемые характеристики, но и разработать эффективные алгоритмы решения обратных задач и, во-вторых, создание скважинного прибора с оптимальными рабочими характеристиками. В последнее десятилетие вопросу изучения распространения квазистационарного электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах посвящено значительное число публикаций [Эпов, и др., 1999; Потапов, Кнеллер, 1999, 2000, 2001, 2002; Морозова и др., 2000; Кузин, 2001; Эпов, Морозова, Антонов и др., 2002, 2003, 2004, 2007; Эпов, Морозова, Могилатов, Антонов, 2003; Иванов, 2005].

Основные результаты главы 5

5.1. Решена задача о квазистационарном электромагнитном поле токового контура в проводящей магнитной, цилиндрически-слоистой среде методом, предложенным А.Н. Тихоновым для горизонтально – однородного полупространства, а также спектральным способом (рис. 4).

В этом случае при численном моделировании по первому способу возникают трудности при достижении необходимой точности на ранних временах, но на поздних временах экспоненциальный ряд, описывающий решение, быстро сходится, и расчёты обеспечивают высокую точность. Обратная картина имеется при расчётах по спектральному способу, который обеспечивает высокую точность решения на ранних временах. Поэтому в созданной программе расчёта неустановившихся полей в цилиндрически-слоистых средах объединены оба алгоритма.

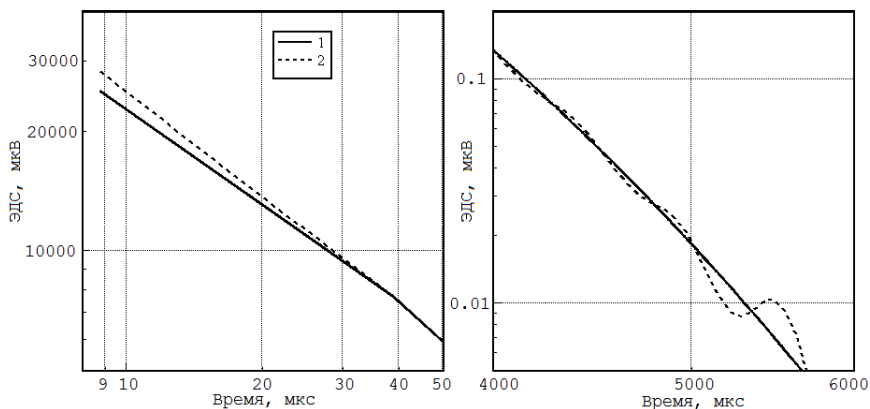


Рис. 4. Численное решение на ранних и поздних временах становления поля: 1 – методом А.Н. Тихонова, 2 - разделения переменных.

Алгоритмы, реализующие решение по первому и второму методу, имеют и самостоятельное значение. Способ решения непосредственно во временной области накладывает ограничение на модель: внутренняя и внешняя части среды должны быть непроводящими. Решение методом разделения переменных, с использованием преобразования Фурье спектральной функции, в рамках одномерной модели, не накладывает каких-либо дополнительных ограничений на её параметры. Поэтому первый способ позволяет изучить особенности изменения устанавливающегося поля при малой толщине стенки колонны, а второй - в моделях, описывающих многоколонные конструкции.

5.2. Приведено приближённое решение задачи для нестационарного электромагнитного поля в двумерной среде путём введения в первое уравнение Максвелла дополнительного стороннего тока, обусловленного неоднородностью. Результаты численных расчётов подтверждены данными физического моделирования и скважинных экспериментов. Полученное на основе борновского приближения решение прямой задачи, описывает поле в неоднородной двумерной среде с высокой степенью достоверности.

В результате проведённого численного анализа нестационарных сигналов в цилиндрических моделях установлены связи его аномальной части с параметрами неоднородностей: положение максимума сигнала на временных срезах соответствует середине неоднородности в виде кольцевой накладки на внешней стенке колонны; характер временного спада аномального сигнала не зависит от ширины неоднородности.

Данные физического моделирования на немагнитных и ферромагнитных образцах труб подтверждают зависимость измеренного нестационар-

ного сигнала от параметров неоднородности, выявленные при математическом моделировании. Она выражается в увеличении амплитуды сигнала, начиная с самых ранних времен, что не может быть объяснено только увеличением толщины стенки колонны.

5.3. Выполнен анализ пространственного распределения электромагнитного поля в проводящем магнитном цилиндре с целью мониторинга состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин. Исследована эффективность различных способов возбуждения и регистрации переменного электромагнитного и постоянного магнитного полей. Проанализированы зависимости сигналов от электромагнитных параметров обсадных колонн, определены области максимальной чувствительности.

В результате этих работ сделан вывод о высокой чувствительности системы радиальных датчиков к внутреннему радиусу колонны. На кривых спада ЭДС в этой установке есть характерные признаки, разделяющие влияние изменений толщины стенки трубы и её магнитной проницаемости.

Вследствие высоких значений магнитной проницаемости и электропроводности металлической колонны, наиболее высокая чувствительность гармонического поля к геометрическим параметрам колонны наблюдается в декагерцевом частотном диапазоне.

5.4. Для двух известных решений задачи о становлении поля вертикального магнитного диполя в трёхслойной среде с цилиндрическими границами получены аналитические выражения для производных нестационарной ЭДС по четырём параметрам модели (r_1, r_2, μ, ρ): внутреннему и внешнему радиусам колонны, магнитной проницаемости и УЭС. Это позволило создать быструю процедуру восстановления ЭДС с использованием первого члена ряда Тейлора. На основании представительного количества расчётов сделан вывод о высокой точности расчётов сигнала при значительной величине вносимых возмущений: относительная погрешность восстановления не превышает 5 % при изменении толщины стенки на 12.5 % (1 мм). Магнитная проницаемость допускает вариации в ещё более широкой окрестности: погрешность не превышает 5 % при её изменении μ на 20 %. Дополнительно проанализирован результат вычисления сигналов с учётом второй производной. Показано, что в этом случае погрешность уменьшается в среднем в 3 - 4 раза, что позволяет в 1,5 - 2 раза расширить область, в которой погрешность не превышает 5 %.

Построено итерационное решение обратной задачи по определению параметров колонны. Для синтетических данных, осложнённых искусственными шумами, проанализирована точность решения при различных отклонениях начального приближения от истинных значений определяемых параметров. Метод успешно опробован также на экспериментальных данных.

5.5. Проведённые лабораторные эксперименты показали, что ферромагнитные обсадные трубы, как объект исследования, в достаточной мере характеризуются вектором параметров - (r_1, r_2, μ, ρ) .

Технологические допуски размеров обсадных труб в большинстве случаев стирают различия между изделиями смежных номиналов по ГОСТ. Эта неопределённость может порождать трудности при работе на скважинах, не имеющих достоверной документации с описанием использованных обсадных труб.

В результате лабораторных измерений удалось установить, что существует возможность фиксировать значение УЭС при интерпретации данных скважинных измерений, задавая с достаточно высокой точностью его значение с учётом температуры.

Оценивая интервал изменения магнитной проницаемости μ как параметра, подлежащего определению, следует признать, что он весьма широк и зависит от того, каким механическим и температурным воздействиям подвергалось изделие.

Анализ погрешностей измерений подтверждает их нормальное распределение, что делает обоснованным использованный вид минимизируемого функционала при решении обратной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является расширение возможностей метода импульсных электромагнитных зондирований за счёт использования моделей, учитывающих низкочастотную дисперсию параметров электропроводности и магнитной проницаемости; создание программно-алгоритмических средств моделирования, анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований в слабонеоднородных и поляризующихся средах; разработка способов совместных индукционных и гальванических измерений, а также специально сконфигурированных гальванических измерений в средах с вызванной электрической поляризацией, направленных на повышение достоверности, разрешающей способности и эффективности метода нестационарных электромагнитных зондирований.

Исследования по теме диссертации имеют перспективы и должны быть продолжены по ряду направлений.

Программно-алгоритмическое обеспечение методов импульсных зондирований для слоистых сред ещё далеко не завершено. Есть острая необходимость создания быстрых алгоритмов, учитывающих анизотропию УЭС при гальванических зондированиях. Разработка таких алгоритмов и программ имеет значение для совместной инверсии данных индукционных и гальванических зондирований.

Установленный факт независимости процессов индукции и магнитной вязкости, даёт основание для развития этого направления в рамках стационарной задачи относительно магнитовязких свойств геологических сред без учёта взаимодействия её отдельных участков.

Одной из не решённых задач, является разработка способов мониторинга напряжённого состояния горных пород по изменениям намагниченности обсадной колонны.

Часть этих работ уже ведётся и они нашли отражение в защищённых под научным руководством автора кандидатских диссертациях (Е.В. Павлов, 2005; А.Н. Шеин, 2010).

Основные публикации по теме диссертации

Монография

1. Эпов М.И., Морозова Г.М., **Антонов Е.Ю.** Электромагнитная дефектоскопия обсадных колонн нефтегазовых скважин (основы теории и методики) // Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео». - 2002. - 102 с.

Статьи в российских журналах, рекомендуемых ВАК

2. Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.**, Ельцов И.Н. Нестационарное электромагнитное поле над средой с малоамплитудной пологой структурой // Геология и геофизика. - 1990. - № 11. - С. 137-142.

3. Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.** Прямые задачи электромагнитных зондирований с учётом дисперсии геоэлектрических параметров // Физика Земли. - 1999. - № 3-4. - С. А48-А55.

4. Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.** Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложно-построенных геологических сред // Геология и геофизика. - 2000. - Т. 41. - № 6. - С. 920-929.

5. Неведрова Н.Н., Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.** и др. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. - 2001. - Т. 42. - № 9. - С. 1399-1416.

6. Эпов М.И., Морозова Г.М., **Антонов Е.Ю.** и др. Способ неразрушающего контроля технического состояния обсадных колонн нефтегазовых скважин на основе электромагнитного зондирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2003. - № 3. - С. 13-23.

7. Эпов М.И., Могилатов В.С., Морозова Г.М., **Антонов Е.Ю.** Нестационарное электромагнитное поле токового контура, расположенного на оси слоистого проводящего магнитного цилиндра // Геология и геофизика. - 2003. - Т. 44. - № 10. - С. 1070-1079.

8. Могилатов В.С., Морозова Г.М., Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.** и др. Нестационарное электромагнитное поле в двумерных моделях скважины

дефектоскопии // Геология и геофизика. - 2003. - Т. 44. - № 11. - С. 1226-1231.

9. Эпов М.И., **Антонов Е.Ю.**, Павлов Е.В. Связь частотной дисперсии электромагнитных параметров и пространственной неоднородности среды с высоким разрешением в электроразведке // Геология и геофизика. - 2004. - Т. 45. - № 6. - С. 734-743.

10. Эпов М.И., Морозова Г.М., **Антонов Е.Ю.** и др. Определение параметров ферромагнитного проводящего цилиндра по данным метода зондирования становлением электромагнитного поля // Геология и геофизика. - 2004. - Т. 45. - №11. - С. 1358-1368.

11. Эпов М.И., Неведрова Н.Н., **Антонов Е.Ю.** Способ учёта характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах // Геофизический вестник. - 2006. - Т. 47. - № 6. - С. 8-14.

12. Эпов М.И., Морозова Г.М., **Антонов Е.Ю.** Электромагнитные процессы в проводящем магнитном цилиндре // Геология и геофизика, - 2007. - т. 48. - № 6. - С. 673-684.

13. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Инверсия данных МПП с учётом быстропротекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика. - 2007. - Т. 48. - № 1. - С. 42-50.

14. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Влияние релаксации намагничённости однородного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 3. - С. 262-276.

15. **Антонов Е.Ю.**, Шеин А.Н. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований при изучении поляризующихся сред // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 10. - С. 1046-1062.

16. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Совместная инверсия данных МПП с учётом индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. - 2009. - Т. 50. - № 2. - С. 181-190.

17. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Влияние релаксации намагничённости двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. - 2009. - Т. 50. - № 10. - С.1157-1170.

18. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Инверсия индукционных переходных характеристик двухслойных сред с учётом быстро устанавливающейся вызванной поляризации зондирований // Геология и геофизика. - 2010. - Т. 51. - № 6. - С. 905-918.

19. Стогний Вас.В., Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Исследование магнитной вязкости горных пород в условиях их естественного залегания с помощью импульсной индуктивной электроразведки // Геология и геофизика. - 2010. - Т. 51. - № 11. - С. 1565-1575.

20. Оленченко В.В., Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.**, и др. Распространение толщи мёрзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV. - № 1. – С. 15-22.

21. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Влияние релаксации намагничённости горизонтального пласта на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. - 2011. - Т. 52. - № 4. - С. 512-520.

Статьи в зарубежных журналах

22. Kozhevnikov N.O., **Antonov E.Yu.** Fast decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities of its use in the permafrost-related TEM studies // Geophysical Prospecting. - 2006. - Vol. 54. - № 4. - P. 383-397.

23. Kozhevnikov N.O., **Antonov E.Yu.** Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: numerical simulation experiment with homogeneous half-space // Journal of Applied Geophysics. - 2008. - № 66. - P. 31-43.

24. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // НАН Украины, Геофизический журнал. - 2009. - Т. 31. - № 4. - С. 104-118.

Материалы конференций

25. **Антонов Е.Ю.**, Эпов М.И. Математическое моделирование нестационарного отклика в квазислоистых поляризующихся средах // 26 сессия международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей», (Екатеринбург, 25-30 января 1999 г.). – Екатеринбург. - 1999. - 2 с.

26. **Антонов Е.Ю.**, Кожевников Н.О. Моделирование влияния релаксации намагнённости горных пород на переходную характеристику установок с незаземленными петлями // Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.С. Микова, (Томск, 19-21 ноября 2003 г.). - 2003. - С. 51-55.

27. Kozhevnikov N.O., **Antonov E.Yu.** Modeling TEM response of a magnetically-viscous conductive ground [электронный ресурс] // 66th EAGE Conference, Extended Abstracts, 2004, Paris, France, 4 p., P088.

28. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Использование быстропротекающей индукционно-вызванной поляризации для картирования мерзлых пород // Сборник трудов международной конференции геофизиков и геологов «ТЮМЕНЬ-2007». - 2007. - 4 с.

29. **Antonov E.Yu.**, Kozhevnikov N.O., Nevedrova N.N. Inversion of TEM Data Affected by Fast-Decaying Induced Polarization [электронный ресурс] // The 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, (Beijing, China, 23-29 October, 2008). – 2008. – Abstracts. - Vol. 1. - P. 114.

30. Кожевников Н.О., **Антонов Е.Ю.** Влияние магнитной вязкости геологических сред на переходные характеристики установок с незаземлёнными петлями [электронный ресурс] // Международная научно-практическая конференция Электромагнитные методы исследований-2010. (Иркутск, 15-20 августа 2010 г.). – 2010. – 2 с. – ISBN 978-5-88942-096-5.

31. **Антонов Е.Ю.**, Кожевников Н.О., Корсаков М.А. «ТЕМ-IP» - система интерпретации данных индукционных импульсных зондирований поляризующихся сред [электронный ресурс] // Международная научно-практическая конференция Электромагнитные методы исследований-2010. (Иркутск, 15-20 августа 2010 г.). – 2010. – 2 с. – ISBN 978-5-88942-096-5.

32 **Антонов Е.Ю.**, Орловская Н.В. Численное моделирование импульсных зондирований проводящих субвертикальных неоднородностей [электронный ресурс] // Международная научно-практическая конференция Электромагнитные методы исследований-2010. (Иркутск, 15-20 августа 2010 г.). – 2010. – 2 с. – ISBN 978-5-88942-096-5.