

*На правах рукописи*

МОГИЛАТОВ Владимир Сергеевич

**ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО  
ТИПОВ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ  
С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

04.00.12 – геофизические методы поисков и  
разведки месторождений полезных ископаемых

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК – 2000

Работа выполнена в Институте геофизики Сибирского отделения  
Российской Академии Наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.П. Губатенко  
доктор геолого-минералогических наук Н.О. Кожевников  
доктор физико-математических наук В.Н. Шуман

Ведущая организация:

Институт геофизики Уральского отделения  
Российской Академии Наук (г. Екатеринбург)

Защита состоится " 11 " июля 2000г. в 10<sup>00</sup> час.  
на заседании диссертационного совета Д 002.50.06 при Объеди-  
ненном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН,  
в конференц-зале.

Адрес: 630090, Новосибирск-90, пр-т Ак. Коптюга, 3  
Факс : (3832) 33-27-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИГГМ СО  
РАН

Автореферат разослан " 5 " июня 2000г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Ю.А.Дашевский

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Объект исследований

Объектом исследования являются физико-математические основы электроразведки с контролируемыми источниками как метода, обладающего нереализованными возможностями в контексте его двуединой природы, и технические средства для реализации этих возможностей.

## Актуальность темы

Разделение электромагнитного поля на составляющие электрического и магнитного типов – давняя и весьма обоснованная традиция во многих приложениях (например, волноводы, магнитотеллурические зондирования) при рассмотрении одномерных задач. Поля контролируемых (обычно сосредоточенных) источников являются трехмерными. Однако, в силу одномерности базовой, горизонтально-однородной модели среды в электроразведке также возможно разделение общего поля на Е и Н-составляющие (поперечно-магнитное и поперечно-электрическое поле, ТМ и ТЕ-поле). Такое разделение позволяет эффективно и просто описать теорию, а также имеет глубокую связь с типами питающих установок.

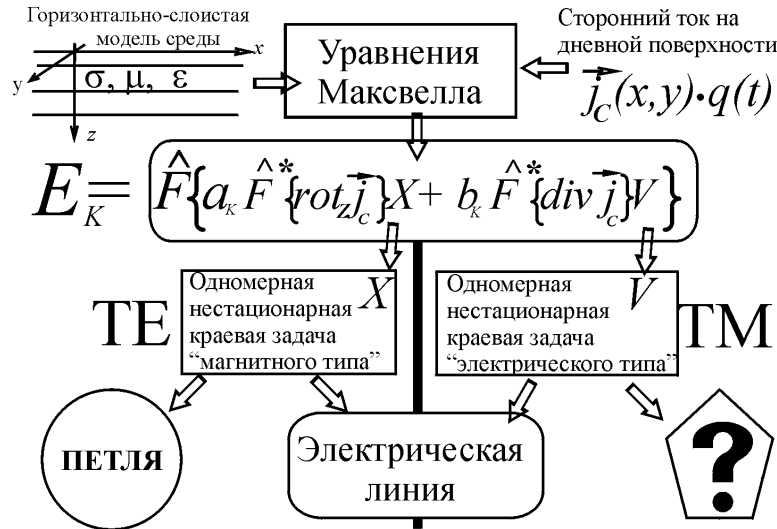


Рис. 1: ТЕ-ТМ-симметрия.

Физико-математическая модель индукционной электроразведки с контролируемыми источниками, обоснованная в главе 1 и представленная условно на рис.1, двуединая и симметрична по от-

ношению к полям электрического и магнитного типов. Но на практике это не реализуется – слабо изучены свойства переменного ТМ-поля, не был известен и наземный источник переменного ТМ-поля, в объявленном смысле симметричный токовой петле. Современная индукционная электроразведка (в частности, импульсная) основана, практически, лишь на использовании поля магнитного типа. Это поле возбуждается индуктивно (например, петлей) и, в целом, речь идет об индуктивной электроразведке. В последнее десятилетие прослеживается тенденция переориентации геоэлектромагнитных исследований на малоглубинные проблемы – экологические, гидрогеологические и инженерные. Эту тенденцию следует связывать именно с индуктивной электроразведкой. Возможна индукционная неиндуктивная электроразведка с использованием переменного поля электрического типа, перспективы которой необходимо исследовать в покидаемых электроразведкой областях применения, а также и в новых малоглубинных вариантах. В данном исследовании применяется, в основном, чисто электродинамический подход. Однако ТЕ-ТМ-анализ электродинамической ситуации, особенно для сложных источников, способствует развитию методов ВП и теоретико-экспериментальной базы для выявления эффектов, выходящих за рамки классической геоэлектродинамики.

Представляется актуальным исследование, направленное на расширение принципиальных возможностей индукционной электроразведки за счет использования поля электрического типа.

#### **Цель работы**

Последовательное развитие физико-математических основ электроразведки с контролируемыми источниками с позиций реализации ТЕ или ТМ-полей и расширение соответствующих технических средств.

#### **Задачи исследований**

1. Построить базовую теорию электроразведки с контролируемыми источниками в двухкомпонентной форме и показать ее связь со свойствами источника.
2. Создать единый базовый (одномерный) математический аппарат для нестационарной геоэлектродинамики с искусственными источниками двумя способами – спектральным и непосредственно во временной области.
3. Программно реализовать алгоритмы для расчета переходных ТЕ, ТЕ+ТМ и ТМ-процессов, возбуждаемых различными источниками.
4. Для традиционной индуктивной импульсной электроразведки (ТЕ-процесс) создать линеаризованные алгоритмы для оперативного расчета прямых задач ЗС в осложненных геоэлектриче-

ских условиях, проанализировать трудности интерпретации площадных данных индуктивных ЗС и предложить новые средства оперативной трехмерной инверсии.

5. На основе развитой теории предложить и обосновать новый источник – круговой электрический диполь (КЭД), возбуждающий только ТМ-поле и переходный процесс электрического типа. Провести анализ свойств ТМ-поля.

6. Предложить, обосновать и опробовать принципиально новый метод электроразведки с использованием переходного ТМ-процесса – зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

#### **Методы исследований и фактический материал**

Основной метод исследований – теоретический и численный анализ краевых задач квазистационарной и нестационарной электродинамики. Аналитические методы решения краевых задач. Метод А.Н.Тихонова решения задачи становления поля. Сравнительный анализ расчетов, полученных при различных подходах. Метод вторичных источников в задачах электродинамики. Привлечение аппроксимационных подходов, основанных на теории возмущений. Численное и физическое моделирование. Полевые эксперименты. Опробование на практическом материале.

В качестве фактического материала в диссертации использовались данные полевых работ (при участии автора) методом ЗВТ в Татарстане и Якутии. Также использовались полевые материалы, результаты интерпретации и данные физического моделирования, полученные от сотрудника отдела электроразведки СНИИГГиМС А.К.Захаркина. Для верификации результатов математического моделирования привлекались расчеты, выполненные по апробированным программам (ЭРА, АЛЕКС – ИГФ СО РАН).

#### **Защищаемые положения и научные результаты**

1. Электроразведка с контролируемыми источниками наиболее полно определяется двуединством полей электрического и магнитного типов и их связью со свойствами источника. Такой подход позволяет построить эффективный и общий математический аппарат и предложить ранее неизвестные технические средства, в частности, источник нового типа.

2. Зондирования вертикальными токами – принципиально новый метод электроразведки, использующий процесс электрического типа – дает дополнительные возможности, обусловленные вертикальной электрической компонентой ТМ-поля и отсутствием на дневной поверхности квазистационарного магнитного отклика от латерально-однородной среды.

3. Построение линеаризованных решений прямых задач импульсных зондирований реализуется путем замены возмущений среды дополнительными источниками и применения борновско-

го приближения. Это решает проблему оперативной трехмерной инверсии в рамках дифракционной томографии, основанной на линеаризованной постановке прямых и обратных задач для сред, описанных как набор стандартных объемных элементов.

4. Синтез традиционного решения задачи становления "в частотной области" и усовершенствованного решения "во временной области" (по А.Н. Тихонову) приводит к надежной и универсальной численной реализации, обеспечивающей глубокий анализ возможностей методов электроразведки, связанных с использованием нестационарных  $E$  и  $H$ -полей.

#### **Научная новизна работы**

1. Впервые последовательно с позиции ТЕ-ТМ-дуальности развиты прикладные аспекты теории, построен замкнутый математический аппарат электроразведки с контролируемыми источниками и проанализированы свойства поля и процесса электрического типа.

2. На основе развитой теории предложен и обоснован совершенно новый для электроразведки наземный источник, возбуждающий только процесс электрического типа (круговой электрический диполь – КЭД).

3. Предложен, обоснован и опробован новый метод импульсной электроразведки на базе переходного ТМ-процесса (зондирования вертикальными токами – ЗВТ).

4. В рамках единого метода устанавливающих пространственных гармоник получены решения прямой задачи становления для плоского произвольного распределения стороннего тока двумя способами (интеграл и ряд Фурье), как суперпозиции поперечно-электрического и поперечно-магнитного полей.

5. Получены описания (численно реализованные) процесса становления во временной области с учетом токов смещения для моделей с плоско-параллельными границами.

6. Предложен общий метод построения приближенных линеаризованных решений для осложненных геоэлектрических условий (в частности, при латеральных изменениях проводимости).

7. На основе линеаризованных решений предложен томографический подход к интерпретации данных индуктивных зондирований, нетрадиционный для этого метода.

8. Для наземно-скважинной электроразведки предложены новые аналитические решения двумерных и квазитрехмерных задач и способ визуализации края протяженной геоэлектрической неоднородности.

#### **Практическая значимость работы**

Результаты исследований позволили предложить новый метод электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ),

как эффективное средство выявления латеральных неоднородностей среды. В частности, уже получены первые результаты при оконтуривании залежей углеводородов. Такие работы в значительных объемах проводятся в настоящее время в Татарстане. Проводится также опробование ЗВТ в Якутии для поиска кимберлитовых трубок.

Результаты исследований, реализованные в комплексе ПОДБОР для интерпретации данных ЗСБ (МПП), нашли применение в 15 научно-исследовательских и производственных организациях России и СНГ, а также в некоторых странах дальнего зарубежья. Интерпретация с применением комплекса ПОДБОР проводилась при разведке нефтяных месторождений, поиске рудопроявлений, решении гидрогеологических задач и поисках кимберлитовых тел. В СНИИГГиМС комплекс ПОДБОР применялся для методических разработок и при проведении контрактных работ (например, в Австралии – на нефть, в Йемене – для гидрогеологических изысканий). Он также используется во многих высших учебных заведениях для подготовки студентов-геофизиков.

#### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты докладывались на УШ Всесоюзной школе по электромагнитным зондированиям (Киев, 1987), на Международных геофизических конференциях и выставках SEG-EАГО (Москва, 1993, 1997, С.Петербург, 1995), на Международной геофизической конференции "Неклассическая геоэлектрика" (Саратов, 1995), на Российской конференции "Теория и практика интерпретации данных электромагнитных геофизических методов" (Екатеринбург, 1996), на 59-ой и 61-ой конференции и выставке EAGE (Женева, 1997, Хельсинки, 1999), на Втором Международном геофизическом конгрессе Казахстана (Алматы, 1998), на Международной конференции "Обратные задачи математической физики" (Новосибирск, 1998).

Диссертационная работа прошла научную апробацию на семинарах ИГФ СО РАН и СНИИГГиМС (Новосибирск, 2000), на объединенном семинаре (Нижне-Волжский НИИ геологии и геофизики, Саратовский государственный университет, Саратовский государственный технический университет) по электромагнитным методам геофизической разведки (Саратов, 2000), на заседании секции Ученого совета по электромагнитным методам и математической геофизики Института геофизики УрО РАН (Екатеринбург, 2000), на семинаре кафедры электрических, магнитных и гравитационных методов МГГА (Москва, 2000), на научном семинаре Института геоэлектромагнитных исследований РАН (г.Троицк, 2000), на семинаре отдела физики Земли Научно-исследователь-

ского института физики Санкт-Петербургского государственного университета, на семинаре отдела импульсной электроразведки ВИРГ-РУДГЕОФИЗИКА (С.-Петербург, 2000), на семинаре отдела математической геофизики Института геофизики НАН Украины (Киев, 2000).

По теме диссертации опубликованы 50 работ, в числе которых 9 авторских свидетельств и патентов.

Результаты, отраженные в диссертационной работе, получены автором в течение длительного периода. За это время автор работал в различных организациях и сотрудничал со многими известными специалистами: В.А.Белашем, Ю.М.Полонским, В.В.Сочельниковым (Геленджикское отделение ВНИИМоргео, позднее, НПО "Южморгео"), Б.И.Рабиновичем, А.К.Захаркиным, М.М. Гольдманом, Г.М. Тригубовичем, [Г.А.Исаевым], В.С.Моисеевым, В.В.Филатовым, Н.Г.Полетаевой, Б.П.Балашовым (СНИИГГиМС).

Автор с благодарностью признает, что за долгий, почти 20-летний период работы в СНИИГГиМС автор пользовался атмосферой исключительного благоприятствования геоэлектромагнитным исследованиям, которую поддерживал академик РАН В.С. Сурков. В частности, автор особо благодарен СНИИГГиМС и министерству отрасли в лице В.З.Гарипова и А.В.Липилина (1992г.) за поддержку в инициализации исследований по созданию метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ), который представлен в этой работе, как один из самых значимых результатов.

Автор выражает особую признательность своим соавторам по наиболее важным практическим результатам – А.В.Злобинскому и Б.П. Балашову, а также Г.В. Саченко и М.Ю. Секачеву, разработчикам аппаратуры и основным исполнителям полевых работ ЗВТ, в некоторых из которых автор принимал непосредственное участие. Автор благодарит геофизиков НПУ "Казаньгеофизика" Р.С.Мухамадиева, Ш.С.Темирбулатова, В.В.Смоленцева, С.А.Феофилова за организацию полевых работ ЗВТ.

Разумеется, автор пользовался помощью и поддержкой своих нынешних коллег – сотрудников лаборатории электромагнитных полей ИГФ СО РАН и благодарит Ю.Н.Антонова, Г.М.Морозову, В.П.Соколова, Ю.А.Дашевского, И.Н.Ельцова, Е.Ю.Антонова, И.О.Исаева.

Автор отмечает также поддержку академиком РАН С.В.Гольдиным исследований по геоэлектромагнитной томографии, по которым открываются серьезные перспективы и получены первые интересные результаты, включенные в диссертационную работу.

Наконец, автор вполне отдает себе отчет в том, что без на-



стойчивого влияния М.И.Эпова эта работа не была бы начата и без его постоянного внимания и поддержки не была бы завершена. Автор свидетельствует об этом с благодарностью, как и о многочисленных полезных обсуждениях, консультациях и о помощи в организации материала.

За время работы в Институте геофизики СО РАН выполнена значительная часть диссертационной работы. Исследования проводились в соответствии с планом НИР ОИГГиМ СО РАН (утвержденным 30.03.98) в рамках приоритетного направления 5.1.5 ("Проблемы нефти и газа") по теме "Взаимодействие с горными породами и распространение электромагнитного поля в геологической среде"(N г.р. 0198000302), а также в рамках интеграционного проекта 97-22 СО РАН "Геотомография"и гранта РФФИ 99-5-64430.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 400 страниц машинописного текста, 104 рисунка. Библиография содержит 153 наименования.

Расположение материалов в диссертации соответствует поставленным задачам в рамках шести основных направлений:

- построение теории и математического аппарата геоэлектромагнитного метода с контролируемыми источниками с позиций разделения на поля магнитного и электрического типа;
- развитие интерпретационных средств традиционной индуктивной импульсной электроразведки, как основного метода, основанного на использовании ТЕ-процесса.
- исследование свойств ТМ-поля в различных режимах (становление, гармонический режим, постоянный ток) с использованием традиционного источника (вертикальный электрический диполь) и нового наземного источника (круговой электрический диполь – КЭД);
- развитие методики линейной аппроксимации и ее применение для построения приближенных линеаризованных решений прямых задач различной размерности в осложненных геоэлектрических условиях;
- описание программного математического обеспечения на основе дуального подхода и синтеза решений в частотной и во временной областях;
- описание, обоснование и изложение первых полевых результатов нового метода электроразведки, основанного на использовании ТМ-процесса – зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Название диссертационной работы отражает такой подход автора к проблемам электроразведки, в котором главным методом анализа принимается разделение контролируемого геоэлектromагнитного поля в горизонтально-слоистой среде на две независимые фракции. Первая возбуждается индуктивным образом и в этой связи употребительны следующие термины: магнитная мода, Н-мода, поле магнитного типа, Н-поле, поперечно-электрическое поле, ТЕ-поле (transverse electric). Такой известный источник, как токовая петля, располагаемая на дневной поверхности или в другой горизонтальной плоскости, возбуждает только ТЕ-поле. Электроразведка, использующая поле магнитного типа обоснованно называется индуктивной (например, в книге В.А.Сидорова), причем, источник необязательно должен быть замкнутым контуром. Другая фракция возбуждается гальваническим путем, прямым током с заземления, а также и индуктивно при наличии ортогональной к границам компоненты стороннего тока. Соответственно, употребляются следующие термины: электрическая мода, Е-мода, поле электрического типа, Е-поле, поперечно-магнитное поле, ТМ-поле (transverse magnetic). Известный традиционный источник, возбуждающий только ТМ-поле, – это вертикальный электрический диполь (ВЭД или линия – ВЭЛ). Также традиционный источник – горизонтальный электрический диполь (ГЭД или линия – ГЭЛ) – возбуждает смешанное поле.

Сам факт такого разделения известен. Можно сослаться здесь на значительные работы Б.С.Светова, В.Г.Романова и С.И.Кабанихина, В.И.Дмитриева, Л.А.Табаровского. В общем теоретическом отношении эта проблема в связи с вопросом скаляризации задач геоэлектродинамики в различных системах координат, в связи также со свойствами стороннего тока исследована в цикле работ Б.С.Светова и В.П.Губатенко.

В диссертационной работе автор настойчиво развивает в большей степени прикладные аспекты этой принципиальной двойственности, пытаясь последовательно реализовать ТЕ-ТМ-симметрию в наземной импульсной электроразведке (но не ограничиваясь этим). Эта симметрия соответствует физико-математическим основам, но совсем не соответствует сложившейся практике. Если исключить методы постоянного тока, которые основаны как раз на применении ТМ-поля, то в современной электроразведке на переменных полях (т.е. индукционной) используется, в основном, ТЕ-поле. Широко известно, чем определяется поздняя стадия становления индуктивного процесса в латерально-однородной среде с изолирующим основанием (суммарной продольной проводимостью), но

гораздо менее известен ответ по поводу ТМ-процесса. Автор стремится к ТЕ-ТМ-симметрии при описании теории, но также и при описании конкретных методик, предлагая альтернативную стационарную неиндуктивную электроразведку, основанную на применении нового наземного источника, чисто гальванического, возбуждающего только ТМ-поле, – кругового электрического диполя (КЭД).

Можно еще раз подчеркнуть, что подход с позиций "ТЕ-ТМ-дуализма" к описанию теории, развитию технических средств и практики электроразведки с контролируемыми источниками есть тема и метод этой работы. Разумеется, автор понимает, что задача электроразведки вовсе не состоит в реализации ТЕ или ТМ-процессов. Индуктивная электроразведка применяется и в существенно трехмерных средах, где разделение поля на Е и Н-поле проблематично. Важность ТЕ-ТМ-подхода в геоэлектрике связана с особой ролью одномерной слоистой модели среды (из признания важности одномерной модели совсем не следует достаточность одномерного подхода при интерпретации).

## **Глава 1. Теория Е и Н-полей при возбуждении источниками разных типов**

Теория электроразведки с контролируемыми источниками развивалась постепенно, осваивая новые режимы работы источников. Самую значительную роль здесь играли отечественные исследователи. Работа многих специалистов кристаллизовалась в отдельных крупных трудах, среди которых книги В.Р.Бурсиана, Л.М.Альпина, Ю.В.Якубовского, Л.Л.Ваньяна, А.И.Заборовского, Б.С.Светова, И.И.Рокитянского, Б.К.Матвеева, В.А.Сидорова, М.С.Жданова, Дж.Р.Уэйта, А.А.Кауфмана и Г.В.Келлера.

В главе 1 предлагаются такие решения одномерных задач контролируемой геоэлектрики, которые и по форме являются суперпозицией полей магнитного и электрического типа при явно обозначенной связи этой формы со свойствами источника (стороннего тока). Напомним, что поле магнитного типа определяется отсутствием вертикальной к границам раздела среды электрической составляющей, а поле электрического типа определяется отсутствием вертикальной магнитной составляющей. Проблема в том, что обычный способ скаляризации уравнений Максвелла – введение потенциалов не приводит сразу и очевидным образом к желаемому результату. Наиболее удобный и прямой путь подсказывается самими определениями ТМ и ТЕ-полей, по которым вертикальная магнитная компонента общего поля принадлежит только полю магнитного типа, а вертикальная электрическая составля-

щая общего поля принадлежит только полю электрического типа.

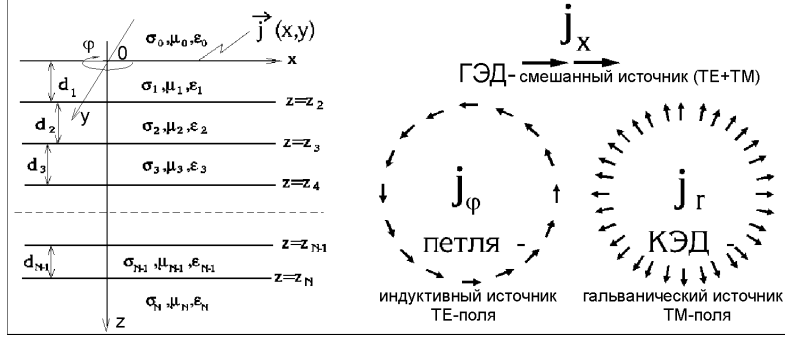


Рис. 2: Модель среды и три типа источников.

Например, в главе 1 поставлена задача о становлении поля от распределенного переменного плоского стороннего тока, описанного как  $\mathbf{j}^{\text{CT}}(x, y) \cdot q(t)$  (в А/м), на дневной (или на любой другой) граничной поверхности ( $z = z_l$ )  $N$ -слойной среды ( $\sigma_i$  – проводимость,  $\epsilon_i$ ,  $\mu_i$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости  $i$ -го слоя,  $i = 0, 1, \dots, N$ , рис.2). Источник учитывается на  $l$ -ой границе ( $z = z_l$ ) как особые условия сопряжения для поля:

$$\begin{aligned} [H_x]|_{z=z_l} &= j_y^{\text{CT}}(x, y) \cdot q(t), & [H_y]|_{z=z_l} &= -j_x^{\text{CT}}(x, y) \cdot q(t), \\ [E_x]|_{z=z_l} &= 0, & [E_y]|_{z=z_l} &= 0, \end{aligned}$$

где  $[ ]$  означает скачок при переходе границы. Определяя преобразования Фурье

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \hat{F}\{f^*(\xi, \eta, z)\} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} f^*(\xi, \eta, z) e^{i(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta, \\ f^*(\xi, \eta, z) &= \hat{F}^*\{f(x, y, z)\} = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) e^{-i(\xi x + \eta y)} dx dy, \end{aligned}$$

выражая все компоненты через  $H_z$  и  $E_z$ , нетрудно получить для образов в каждом  $i$ -ом однородном слое:

$$\begin{aligned} H_x^* &= \bar{\eta}(\sigma_i V + \epsilon_i \dot{V}) D^* + \xi X_z' R^*, & E_x^* &= \bar{\xi} V_z' D^* - \bar{\eta} \mu_i \dot{X} R^*, \\ H_y^* &= -\bar{\xi}(\sigma_i V + \epsilon_i \dot{V}) D^* + \bar{\eta} X_z' R^*, & E_y^* &= \bar{\eta} V_z' D^* + \bar{\xi} \mu_i \dot{X} R^*, \\ H_z^* &= X R^*, & E_z^* &= V D^*, \end{aligned}$$

где  $\bar{\xi} = \frac{i\xi}{\lambda^2}$ ,  $\bar{\eta} = \frac{i\eta}{\lambda^2}$ ,  $\lambda = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ , знаки  $()$  и  $()_z$  означают производные по времени и по координате  $z$ ,

$$R^* = \hat{F}^* \{ \text{rot} \mathbf{j}^{\text{CT}} \}, \quad D^* = \hat{F}^* \{ \text{div} \mathbf{j}^{\text{CT}} \}.$$

Для  $X$  и  $V$  получаем краевые задачи "магнитного" и "электрического" типов:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \lambda^2 U = \mu_i \sigma_i \frac{\partial U}{\partial t} + \mu_i \varepsilon_i \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (U = X, V),$$

а) для функции  $X$       б) для функции  $V$

$$[\mu X]|_{z=z_i} = 0, \quad [\sigma V + \varepsilon \dot{V}]|_{z=z_i} = \begin{cases} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases},$$

$$[X'_z]|_{z=z_i} = \begin{cases} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases}, \quad [V'_z]|_{z=z_i} = 0,$$

$$X \rightarrow 0, \quad V \rightarrow 0, \quad |z| \rightarrow \infty.$$

Анализ возбуждения произвольным плоским распределением стороннего тока позволяет установить, что поле магнитного типа возбуждается ротором ( $\text{rot}_z$ ) этого распределения, а поле электрического типа – дивергенцией. Это немедленно определяет три класса питающих установок на дневной поверхности – незаземленные контуры с током (индуктивное возбуждение ТЕ-поля), заземленные проводники (гальвано-индуктивное смешанного поля) и радиальный сторонний ток с азимутальной симметрией (гальваническое возбуждение ТМ-поля). Последний класс источников (круговой электрический диполь (КЭД), рис.2) был ранее неизвестен и его реализация серьезно стимулирует теорию и практику электроразведки.

Одномерные задачи для  $X$  и  $V$  решаются для гармонического, также и для импульсного режима двумя способами, приводящими к интегралу Фурье и, при некоторых ограничениях, к ряду Фурье. Таким образом, в рамках единого подхода получены два представления решения задачи об установлении поля. Первое фактически совпадает с известным решением в виде обратного преобразования Фурье решения в частотной области. Второе является развитием решения, предложенного А.Н.Тихоновым.

Аналогично решаются задачи для других типов источников – плоское распределение магнитного тока и вертикальный электрический источник. Вместе с рассмотренным плоским распределением электрического тока, это удовлетворяет нужды традиционной электроразведки, но также предусматривает возможные

экзотические варианты малоглубинной геоэлектрики. Учет анизотропии среды, существенный для Е-поля, рассматривается на примере возбуждения горизонтальным магнитным диполем (элементарный магнитный ток).

Другая сторона ТЕ-ТМ-подхода, использованного в главе 1, состоит в анализе соотношения между типами возбуждаемых полей и способами возбуждения. Так, например, установлено, что поле вертикального электрического диполя – поле чисто электрического типа – возбуждается двумя способами – гальванически (заземлениями) и индуктивно (отрезком тока), что находит отражение в пространственно-временной структуре поля этого источника.

При объявленном подходе вопрос о режиме возбуждения (постоянный, гармонический, импульсный ток) второстепенен, в то же время желательно рассматривать все возможности. Наибольшее внимание уделяется импульсному режиму.

Теория становления электромагнитных полей в проводящей Земле наиболее определенно начала свое развитие с классических работ А.Н.Тихонова и С.М.Шейнмана, в которых определились основные способы решения прямой одномерной задачи становления. В дальнейшем в развитии теории методов нестационарного и квазистационарного электромагнитного поля в геофизике принимало участие очень большое число специалистов. На эту работу оказали непосредственное влияние, кроме уже упомянутых, работы О.А.Скугаревской, Д.Н.Четаева, Л.Л.Ваньяна, П.П.Фролова, В.И.Дмитриева, Б.С.Светова, Л.А.Табаровского, А.А.Кауфмана, Г.М.Морозовой, В.К.Bhattacharyya, J.R. Wait. Автор в разное время обращался также к работам И.С.Гельфанда, В.Г.Астраханцева, М.Н. Бердичевского, В.В. Сочельникова, Ф.М. Каменецкого, П.П. Макогонова, А.Б.Великина, Л.Б.Гасаненко, Д.С.Даева, В.В. Кормильцева, В.А.Белаша, И.А.Безрука, А.В. Куликова, Ю.С. Королькова, В.П.Губатенко, М.И.Эпова, В.Н.Шумана, Н.О. Кожевникова.

Как известно, частотный подход, использованный впервые наиболее основательно С.М.Шейнманом, получил преимущественное применение и для этого есть известные причины. Однако существует другой подход к решению задачи о становлении, "во временной области", который предложил А.Н.Тихонов, и автор систематически занимался его развитием.

Решение А.Н.Тихонова, а, тем более, технология его получения, известны далеко не так хорошо, как решение в частотной области, и в главе 1 приведено его подробное построение в рамках стандартной теории задачи Штурма-Лиувилля. Решение имеет известные ограничения (только в квазистационарном прибли-

жении при изолирующих верхнем и нижнем полупространствах), но позволяет легко получать асимптотические представления для поздних стадий становления в таких средах. Это дает возможность весьма наглядно показать разницу в процессах становления между индуктивной (H-поле) и гальванической (E-поле) составляющими и объяснить, например, почему же всякий наземный источник (кроме КЭД) проявляет себя как только индуктивный в поздней стадии.

Таким образом, в главе 1 приводятся решения задачи становления для источников различного типа двумя способами, которые предлагаются как альтернативы при разделении переменных в рамках метода устанавливающихся пространственных гармоник. Но важно также, что для автора при численной реализации математического обеспечения для электроразведки ЗС надежной алгоритмической опорой стал синтез этих двух подходов. Приведем, например, решение во временной области для поля КЭД, расположенного на поверхности двухслойной среды  $(\sigma, h)$  с изолирующим основанием. В квазистационарном приближении

$$V(z, t) = -\frac{2\pi}{\sigma} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j}{j^2\pi^2 + \lambda^2 h^2} \cdot \sin\left(\frac{j\pi}{h} z\right) \cdot \exp\left[-\frac{t(j^2\pi^2 + \lambda^2 h^2)}{\mu_0 \sigma h^2}\right].$$

Выражения для компонент поля установки КЭД с точечным центральным заземлением и радиусом  $b$  есть:

$$\begin{aligned} H_{\varphi}(r, z, t) &= -\frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) [J_0(\lambda b) - 1] \sigma V(z, t, \lambda) d\lambda, \\ E_r(r, z, t) &= -\frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) [J_0(\lambda b) - 1] \frac{\partial V(z, t, \lambda)}{\partial z} d\lambda, \\ E_z(r, z, t) &= \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) [J_0(\lambda b) - 1] V(z, t, \lambda) \lambda d\lambda. \end{aligned}$$

Основой интерпретационного процесса в геоэлектрике являются процедуры решения прямой и обратной одномерных задач. Обратная задача решается обычно с помощью анализа чувствительности прямой задачи к изменениям параметров среды. И обычно такой анализ проводится путем многократного использования процедуры прямой задачи. В главе 1 предлагается интегральный

аналитический способ расчета производных отклика по параметрам геоэлектрического разреза. Суть способа состоит в рассмотрении вариаций краевых одномерных задач, возникающих после отделения латеральных координат, для Е и Н-мод. Практическим результатом явилось создание численных процедур прямых задач (для гармонического и режима становления), в которых расчет производных производится, при необходимости, как добавочный к сигналу продукт с незначительными дополнительными затратами машинных ресурсов.

## **Глава 2. Индуктивные импульсные зондирования**

В главе 2 рассматриваются некоторые проблемы индуктивной импульсной электроразведки (метод переходных процессов – МПП, зондирования становлением в ближней зоне – ЗСБ и пр.), как наиболее современного и важного метода, основанного на использовании ТЕ-процесса становления в качестве базового. К тому же автор много занимался математическим обеспечением этого способа электроразведки.

Определяющее значение в утверждении индуктивной импульсной электроразведки имели усилия А.А.Кауфмана, Г.М.Морозовой, В.А.Сидорова, В.В.Тикшаева, Ф.М.Каменецкого, Б.И.Рабиновича, А.К.Захаркина.

В этой работе, разумеется, не приводится систематическое и всестороннее описание метода. Здесь рассматриваются лишь избранные интересные ситуации, связанные со свойствами ТЕ-процесса (например, искажения от удаленных по латерали неоднородностей на результаты одномерной интерпретации или влияние сильнопроводящего основания). На изложение также влияют последующие главы (3 и 5), где рассматривается возможная альтернатива – неиндуктивная импульсная электроразведка, основанная на использовании ТМ-процесса.

Использование ТЕ-поля началось с перехода от методов постоянного тока (постоянное ТМ-поле) к индукционным методам электроразведки. Причем быстро обнаружилось, что удобно возбуждать среду индуктивно, незаземленным контуром и принимать так же, индуктивно. Что означало переход уже на использование только ТЕ-поля. Таким образом, современные методы электроразведки (индуктивные) отличаются от методов на постоянном токе не только режимом питания (и не столько), но и типом используемого поля. Основное физическое отличие при этом состоит в том, что ТМ-поле имеет вертикальную электрическую компоненту, а ТЕ-поле такой компоненты не имеет.



В этой главе кроме ряда задач индуктивной импульсной электроразведки с использованием одномерных моделей сред, рассмотрена задача, связанная с аппроксимацией геоэлектрического разреза в условиях сильнопроводящей ВЧР (верхней части разреза). Аппроксимация состоит в замене латерально-неоднородного разреза проводящей неоднородной плоскостью. Автором предложен алгоритм расчета становления электромагнитного поля в горизонтальной проводящей пленке с произвольным распределением продольной проводимости, помещенной на некоторую глубину от дневной поверхности. В квазистационарном приближении задача сводится к двумерной задаче определения устанавливающегося распределения токов.

Квазистационарное приближение до сих пор считалось вполне достаточным для метода зондирования становлением электромагнитного поля. Однако традиционные методики исчерпывают себя, вместе с тем, технические возможности растут, становятся доступными для точных измерений сверхдлинные, наносекундные стадии процесса становления. Появляются результаты экспериментальных исследований в этой области (например, Н.О.Кожевников). Интегральные представления решения задачи о становлении электромагнитного поля в горизонтально-однородной среде с учетом токов смещения известны, как преобразования Фурье гармонического режима, но численная реализация интегралов Фурье в этом случае (на сверхдлинные времена) – задача сложная. Здесь предлагаются иного вида полные решения во временной области, численно реализованные для простых сред с одной и с двумя границами. Впервые подобное решение задачи становления для среды с одной границей предложил в 1959 году B.K. Bhattacharyya. Однако, решения, приведенные в диссертации, содержат дополнительные элементы (особенности в моменты прихода волн), которые впервые пришлось объяснять и анализировать.

Одномерная кусочно-однородная среда – основная, базовая интерпретационная модель в геоэлектромагнитных исследованиях, в особенности, в методах становления поля с контролируемым источником. В процессе интерпретации достаточно часто обнаруживается, что базовая модель неадекватно описывает реальную среду, но любое усложнение этой модели наталкивается на трудности численной реализации. Разумеется, есть возможность применения сугубо численных методов, разностных, например, но стоит помнить о трудностях вовлечения таких методов в оперативный интерпретационный процесс. В главе 2 показано, как можно просто разрешить некоторые осложнения, оставаясь "вблизи" базовой модели и пользуясь почти теми же алгоритмическими средствами, что и для самой базовой модели. Привлекая известный

метод возмущений, автор предлагает здесь несколько конкретных его применений, используя также представления о вторичных источниках. При этом рассмотрены в едином ключе в качестве элементов аппарата инверсии: *приближенные линеаризованные решения задачи становления поля различной размерности; способ приближенного учета токов смещения; интегральный метод определения производных поля по параметрам разреза; способ декомпозиции сигнала становления поля на парциальные вклады отдельных слоев.* Эти алгоритмы численно реализованы.

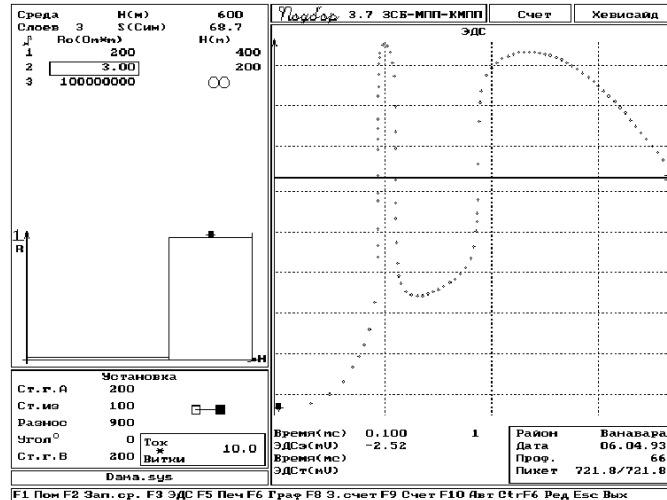


Рис. 3: Кривая становления с тремя переходами через 0.

В главе 2, при использовании программно реализованных математических средств, описанных в главах 1,2 и 4, смоделированы некоторые сложные ситуации, возникающие при интерпретации данных индуктивной импульсной электроразведки. Прежде всего, автор стремился показать, что одномерный подход к интерпретации требует осторожного обращения в случае применения соосных установок при зондированиях, и мало применим при интерпретации разнесенных и площадных зондирований. Приводим здесь ранее не известный пример (обнаруженный нами совместно с А.К.Захаркиным) столь сложного поведения кривой разнесенных зондирований, что это делает весьма сомнительным применение такого устоявшегося приема, как трансформации в кажущиеся величины. Даже по отношению к данным, относящимся к одномерной слоистой модели. На рис.3 представлен сигнал от

разнесенной установки "петля-петля", расположенной на дневной поверхности трехслойной среды. Три перехода через "0", конечно, само по себе необычно, но каковы же возможности для прослеживания слабых аномальных эффектов на этом изменчивом фоне?

Критикуя слишком упрощенный подход, автор предлагает возможный способ оперативной, разумно и максимально упрощенной, но, по сути, все-таки трехмерной интерпретации площадных данных на основе томографического подхода. Автор считает проблему оперативной трехмерной инверсии наиболее актуальной сейчас для индуктивной импульсной электроразведки и выносит на обсуждение предварительные результаты по развитию томографической технологии. Томографическая инверсия есть один из способов решения обратной задачи, в котором предполагается некоторая определенная специфика. Прежде всего от томографической инверсии ждут весьма оперативного результата в виде некоторых изображений среды (объемных или разрезов). Это достигается за счет известных упрощений. Для томографической инверсии характерно использование приближенного, обычно, линеаризованного решения прямой задачи. Такая постановка проблемы предусматривает привлечение эффективного аппарата линейной инверсии. Приближение (линеаризация) может сопровождаться и упрощениями модели физического процесса. Характерным для томографического подхода является также приближенное, но достаточно подробное и универсальное описание среды (или возмущения некоторого параметра среды), как совокупности стандартных, однородных внутри элементов. В работе определены следующие положения, на которых основывается подход: *среда состоит из множества стандартных элементов; строится линеаризованное решение многомерной прямой задачи в окрестности простой (одномерной или даже однородной) референтной модели; инверсия заключается в обращении линейной системы, связывающей экспериментальные данные и возмущения геоэлектрических параметров относительно референтной среды; структура среды восстанавливается по полученному в результате инверсии пространственному распределению параметров (например, электропроводности).*

Центральным пунктом в предлагаемом подходе является эффективное решение прямой задачи в линейном приближении. Совокупность экспериментальных наблюдений, полученных при различных условиях (время регистрации, положение источника, точка наблюдения) соотносится с соответствующими линеаризованными представлениями. В результате формируется линейная система для определения совокупности кусочно-постоянных невязимодействующих между собой возмущений проводимости.

В диссертационной работе показана работоспособность томографического подхода на синтетических и экспериментальных данных.

В заключении главы 2 обращается внимание на главные (взаимосвязанные) особенности индуктивного процесса становления – широкий латеральный охват среды и высокочастотный регистрируемый сигнал, при том, что это определяется только продольной проводимостью разреза. Первая особенность требует почти всегда трехмерного (по проводимости) подхода к интерпретации, а вторая предъявляет серьезные требования к измерительной аппаратуре. Практически – это трудновыполнимые требования. Из этих обстоятельств вполне уместно сделать и такой вывод, что, может быть, стоит подумать и о других средствах для геоэлектрических экспериментов, нежели токовая петля и ТЕ-процесс.

### Глава 3. Поле электрического типа в электроразведке

В главе 3 анализируются свойства ТМ-поля, возбуждаемого контролируемыми источниками в геоэлектрической среде. Наличие вертикальной компоненты электрического поля – важнейший физический аспект применения ТМ-поля в геоэлектромагнитных исследованиях. Поле электрического типа иначе взаимодействует с геологической средой, нежели поле магнитного типа. Прежде всего, мы сталкиваемся с влиянием анизотропии.

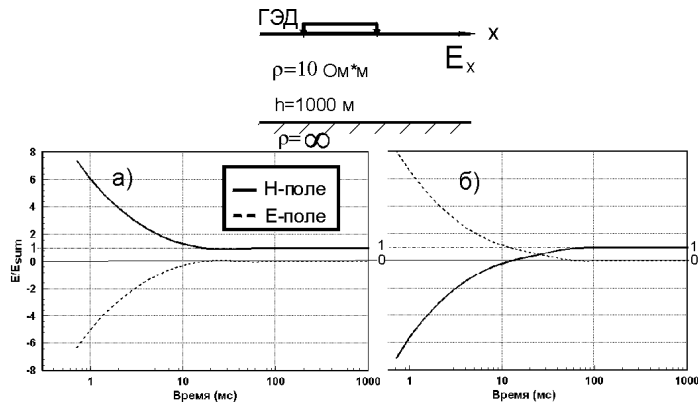


Рис. 4: Вклады  $E$  и  $H$ -полей в полное поле для осевой (а) и экваториальной (б) установок  $ABMN$

Можно сделать общее замечание, что ТМ-поле менее "естественно" для горизонтально-слоистого разреза, нежели ТЕ-поле,

образующее систему только горизонтальных токов. Это проявляется, например, в более быстром затухании ТМ-отклика, что приводит к тому, что электрическая горизонтальная линия, возбуждающая поля обоих типов, в поздней стадии становления является фактически индуктивным источником. Это демонстрируется на рис.4, где представлены кривые становления для традиционной установки  $ABMN$  в виде относительных вкладов в полное поле  $E$  и  $H$ -составляющих.

Так что для практического использования ТМ-процесса необходимо применять источник, не возбуждающий совсем ТЕ-поля. Такой источник давно известен – это вертикальный электрический диполь (ВЭД), размещаемый в скважинах. Однако, кроме ограничений технического плана, связанных со скважинами (или их отсутствием) тут таится еще один подводный камень: скважины имеют наклоны, а самые небольшие отклонения от вертикали приводят к появлению медленно затухающего поля магнитного типа.

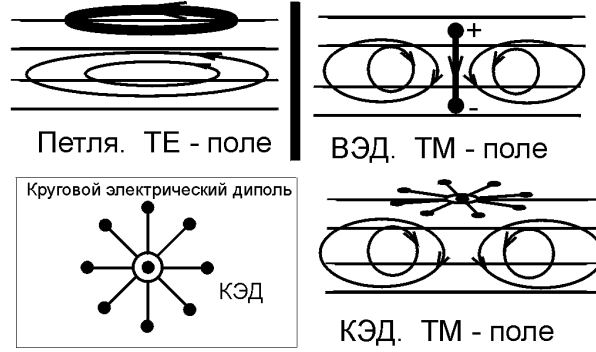


Рис. 5: Круговой электрический диполь.

В свое время (1982г.) мы предложили наземный аналог вертикальной электрической линии – круговой электрический диполь (КЭД). Возбуждение среды производится изотропным радиальным распределением стороннего тока, что реализуется набором радиальных электрических линий (рис.5). В диссертационной работе, в главе 1 на теоретическом уровне определено, что такое распределение стороннего тока есть необходимое условие возбуждения переменного ТМ-поля с дневной поверхности. Геометрия такого источника управляема и контролируема. В главе 3 показано, что в низкочастотной области, а также и в поздней стадии становления поля ВЭД и КЭД совпадают при условии

$$Idzz_0 = I_0b^2/4,$$

где  $Idz$  - момент ВЭД,  $z_0$  - глубина погружения ВЭД,  $I_0$  и  $b$  - ток и радиус КЭД.

В главе 3 строится теория КЭД (а тем самым и теория контролируемого ТМ-поля), в развитии которой нам существенную помощь и, что еще дороже, моральную поддержку оказал Дж.Р.Уэйт.

Надо заметить, что в силу одностороннего развития индукционной электроразведки (использование только ТЕ-поля) свойства ТМ-поля оказались неизучены и неизвестны. Этот пробел, насколько возможно, восполняется в диссертационной работе, где ТМ-поле анализируется в частотной и временной областях с привлечением традиционных моделей и приближений (полупространство, более сложные модели сред, низкие частоты, сверххранение, ранние и поздние стадии). Приведем здесь выражение для поля КЭД ( $I_0$ -ток,  $b$ -радиус) в поздней стадии становления в двухслойной среде ( $\sigma$ ,  $h$ ):

$$E_r(t) \simeq \frac{I_0}{4\pi\sigma h^2} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \frac{r}{h} \left(\frac{\sigma\mu_0 h^2}{2t}\right)^2 \exp\left(-\frac{\sigma\mu_0 r^2}{4t}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 t}{\sigma\mu_0 h^2}\right).$$

Свойства переходного ТМ-процесса, весьма необычны с точки зрения более привычного процесса магнитного типа. Процесс не определяется только суммарной продольной проводимостью, динамические характеристики также иные, нежели ТЕ-процесса. Спад более быстрый, а в средах с изолирующим основанием – экспоненциальный. Причем, показатель экспоненты зависит, в принципе, от всех параметров геоэлектрического разреза, что обеспечивает уникальную разрешающую способность ТМ-процесса. Известная S-эквивалентность недействительна по отношению к ТМ-процессу. Впрочем, для ТМ-процесса не существует и такая популярная модель, как "S-плоскость в воздухе" (а набор таких плоскостей ни в каком отношении не заменяет реальную среду). Важнейшим свойством ТМ-поля является отсутствие квазистационарного магнитного отклика на поверхности горизонтально-слоистого разреза.

Таким образом, возможность возбуждения чистого ТМ-поля существует, но можно ли измерить его? В режиме становления в силу способа возбуждения (прямой ток) и характера электрического поля (наличие вертикальной компоненты) измерения могут оказаться в значительной или в подавляющей степени относящимися к процессам ВП. Впрочем, это не означает, что ТМ-процесс становления нельзя использовать для изучения распределения электропроводности среды. Именно такой метод описан в главе 5.

Все же роль ТМ-поля в индукционной электроразведке пока незначительна, хотя, напомним, до возникновения индукционного метода постоянное ТМ-поле было единственной основой электроразведки. В главе 3 приведены некоторые результаты, полученные автором для методов постоянного тока, конкретно, для наземно-скважинной электроразведки, в той части, в которой они достаточно оригинальны и в тех ситуациях, где проявления свойств постоянного ТМ-поля наиболее характерны. Эти ситуации возникают при применении в качестве источника вертикального электрического диполя (или линии) в средах с изолирующим основанием. В своих исследованиях по наземно-скважинной электроразведке автор опирался на работы В.Н.Дахнова, И.М.Блоха, А.М.Загармистра, В.С.Карпия, Н.А.Киричека, В.М.Сапожникова, В.Д.Кукурузы, В.С.Моисеева, А.П.Яковлева и получал результаты в сотрудничестве с Б.И.Рабиновичем, Н.Н.Тарло, А.М.Гендельманом. На взгляд самого автора, его вклад состоит в развитии достаточно оперативного двухмерного математического моделирования на основе решения краевых задач оригинальным способом частичного разделения переменных; в построении методики приближенного учета обсадной колонны при математическом моделировании; в предложенном способе оконтуривания протяженных неоднородностей.

Как объединяющее проблемы наземно-скважинной электроразведки и замечательные свойства ТМ-процесса в конце главы приведено решение для поля становления ВЭД, заземленного в металлической обсадной колонне.

$$E_r = \frac{I_0 \rho}{\pi h} \sum_{n=1}^{\infty} Z_n T_n, \quad Z_n = \frac{\alpha}{\text{sh}(\alpha L)(\alpha^2 + \beta_n^2)} \{ \alpha \text{sh}(\alpha L) \times \\ \times [\cos(\beta_n z_{01}) - \cos(\beta_n z_{02})] - \beta_n \sin(\beta_n L) [\text{ch}(\alpha z_{01}) - \text{ch}(\alpha z_{02})] \}, \\ T_n = \exp\left(-\frac{n^2 \tau^2}{8h^2}\right) \int_0^{\infty} \frac{J_1(\lambda r) \lambda^2 \exp[-(\lambda^2 \tau^2)/(8\pi^2)]}{\lambda^2 + \beta_n^2} d\lambda.$$

Здесь в скважине длиной  $L$  в двухслойном разрезе  $(\rho, h)$  с изолирующим основанием размещена заземленная по концам  $(z_{01}, z_{02})$  линия с током  $I_0$ . Ток выключается и изучается становление радиального градиента на дневной поверхности на расстоянии  $r$  от устья.  $\tau = \sqrt{8\pi^2 t \rho / \mu_0}$ ,  $\alpha$  - параметр обсадной колонны,  $\beta_n = \pi n / h$ .

## Глава 4. Программное математическое обеспечение индукционной электроразведки

В главах 1-3 диссертации приводятся результаты, в основном, теоретических исследований. В главе 4 предъявляется один из прикладных результатов этих исследований, состоящий в создании комплексов программ для геоэлектрики с контролируемыми источниками, главным образом, для зондирований становлением. Собственно, в 1-3 главах многие теоретические выводы и результаты иллюстрировались расчетами с использованием этого матобеспечения (пакет MAGsoft, комплекс ПОДБОР).

В истории электроразведки процесс программной реализации базовых (одномерных) прямых задач во временной области до степени оперативного расчета занял длительный период времени и связан, с одной стороны, с решением алгоритмических проблем, с другой – с развитием вычислительной техники. Следует отметить исследователей, которые, внося большой вклад в теорию, проложили также путь к численной реализации решений прямых задач становления: Л.Л.Ваньян, А.А.Кауфман, Г.М.Морозова, Л.А.Табаровский, В.П.Соколов, М.И.Эпов, В.А.Филатов, В.П.Лепешкин, W.L.Anderson.

Особенностями созданного нами матобеспечения являются:

- 1) последовательное применение провозглашенного в этой работе ТЕ-ТМ-дуального подхода к решению прямых задач геоэлектрики с искусственными источниками;
- 2) синтез "решений в частотной области" и "решений во временной области" (путем развития способа, предложенного А.Н. Тихоновым);
- 3) интегральный способ расчета производных сигнала по параметрам разреза по тому же алгоритму и параллельно расчету самого сигнала.

Прежде всего речь идет о пакете программ MAGsoft расчета прямых 1D-задач электромагнитных зондирований становлением поля. На рис.6 поясняется устройство пакета MAGsoft.

Возможен расчет полей для следующих контролируемых источников: *горизонтальный электрический диполь (ГЭД); вертикальный электрический диполь (ВЭД); вертикальный магнитный диполь (ВМД); круговой электрический диполь (КЭД).*

Таким образом, включены все типы источников для ЗС: *чисто индуктивный (только ТЕ-поле) – ВМД, чисто гальванический (только ТМ-поле) – КЭД, гальвано-индуктивный источник ТМ-поля – ВЭД и смешанный гальвано-индуктивный источник смешанного же поля – ГЭД.*

Для каждого из этих источников предусмотрено: *расчет всех*



компонент, включая производные магнитной индукции; помеще-  
ние точки наблюдения в любом месте (глубине) разреза; поме-  
щение самого источника в любом месте (глубине) разреза; воз-  
буждение импульсом тока произвольной формы.

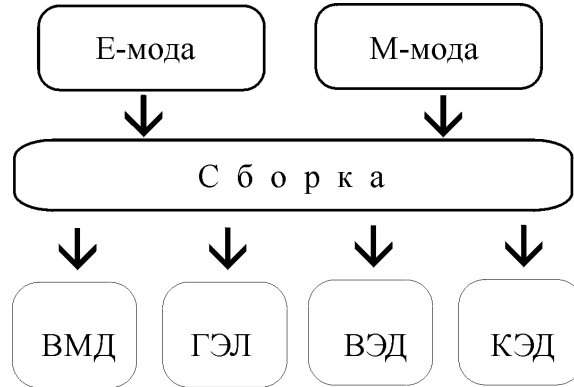


Рис. 6: Схема устройства пакета MAGsoft

Горизонтально-слоистый разрез может включать до 20 слоев (условное ограничение). Время расчета зависит от числа слоев и практически определяется первыми секундами (PC IBM Pentium).

Если пакет программ MAGsoft имеет научно-методическое значение для методов ЗС в целом, то комплекс ПОДБОР создан, как матобеспечение конкретного метода (ЗСБ-МПП) и получил широкое практическое применение. Подобных программных продуктов было создано довольно много в мире, однако, к наиболее значительным и выдержавшим испытание временем относятся системы ЭРА (Л.А.Табаровский, М.И.Эпов, И.Н.Ельцов) и ПОДБОР (В.С.Могилатов, А.В.Злобинский) в России и TEMIX (Ch.H. Stoyer, W.L.Anderson) на Западе. Это объясняется созданием удобного пользовательского графического интерфейса и оригинальным в каждом случае решением проблемы быстрого действия процедуры решения основной (многослойной) прямой задачи.

Комплекс программ ПОДБОР (рис.7) для интерактивной интерпретации данных ЗСБ (МПП) на персональных ЭВМ типа IBM PC создан на основе алгоритмов, описанных в главе 1 и 2 и включает в себя:

ПОДБОР – система многослойной интерпретации данных одного пикета на основе ручного и автоматического решения обратной задачи методом подбора в классе одномерных моделей.

ПРОФИЛЬ – система для разнообразных и регулируемых поль-

зователем профильных представлений первичного материала, а также результатов слоистой интерпретации.

FAST3D – программа быстрого расчета влияния локальных нарушений горизонтальной однородности разреза на процесс становления. На ПК время для одного объекта составляет первые минуты. Использован линеаризованный алгоритм (глава 2).

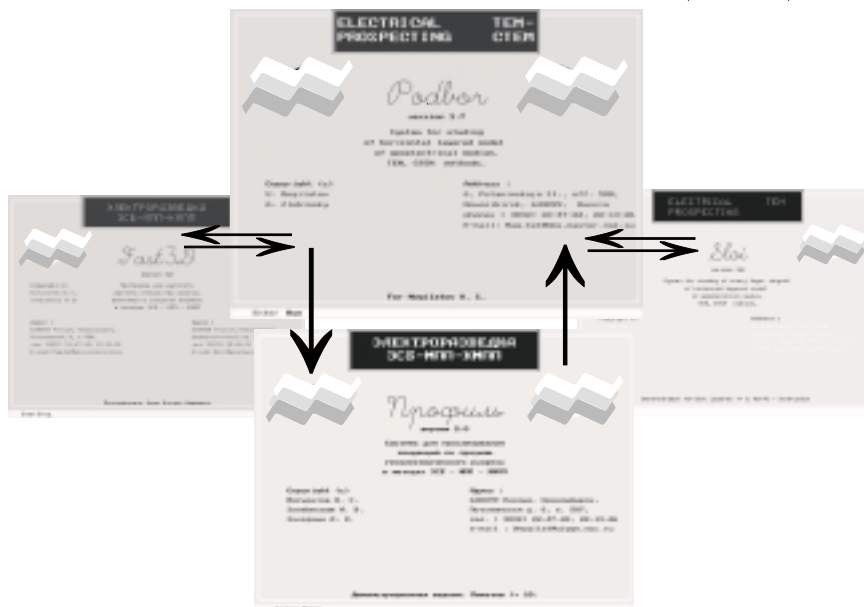


Рис. 7: Комплекс ПОДБОР

СЛОЙ – программа для весьма детального анализа процесса становления во многослойной среде при возбуждении любым сложным по форме импульсом возбуждающего тока. Здесь можно оценить физические предпосылки для успешного решения задачи электромагнитного зондирования.

Особенностью комплекса является использование решения во временной области, а также синтез такого решения и традиционного решения в частотной области. Другой важной особенностью является наличие процедуры расчета прямой задачи, реализующей также аналитический, интегральный способ расчета производных по параметрам модели среды.

Помимо основных авторов, соавторами отдельных компонент комплекса являются также А.К.Захаркин (система ПРОФИЛЬ), М.И. Эпов и Е.Ю.Антонов (программа FAST3D 3.0). Создание

и развитие комплекса стимулировалось требованиями высококвалифицированных пользователей – геофизиков (практиков и исследователей) из различных организаций. Следует отметить В.В.Лифшица, Г.М.Тригубовича, Г.А.Исаева, Н.Н.Тарло, В.М.Бубнова, M. Goldman (Израиль), а также специалистов компании CRA Exploration Pty Limited (Австралия) R.Smith, J.Paine, R.Lane. Особое значение имели постоянное внимание А.К.Захаркина и использование его большого опыта практических работ по ЗСБ. Авторы глубоко благодарны этим специалистам.

Комплекс ПОДБОР нашел применение при работах методом ЗСБ (МПП) во многих странах (Россия, Украина, Казахстан, Австралия, Франция, Израиль, Йемен). Может применяться для интерпретации данных индуктивной импульсной электроразведки в морском, скважинном и аэровариантах. Комплекс ПОДБОР имеет совершенно самостоятельное значение, но в контексте этой работы описание этого матобеспечения приведено, как пример прямого практического использования теоретических разработок, представленных в главах 1 и 2.

Кроме крупных программных объектов MAGsoft и ПОДБОР, обслуживающих квазистационарный режим становления, на основе математического аппарата, построенного в главе 1, программно реализованы алгоритмы расчета для других режимов. В частности:

- 1) программа для расчета поля произвольно ориентированного магнитного диполя с гармоническим режимом в слоистой анизотропной среде – для целей электроразведки и индукционного каротажа (с оперативным расчетом производных по параметрам разреза);
- 2) аналогичная программа для источника постоянного тока;
- 3) программы расчета процесса становления с учетом токов смещения для простых сред.

## **Глава 5. Зондирования вертикальными токами**

В главе 5 описывается новый метод индукционной электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ), как конкретный и важный практический результат общего подхода и теории, предлагаемых в этой работе. Метод создавался и развивается сейчас на базе СНИИГГиМС при научном руководстве автора диссертационной работы в соавторстве с Б.П.Балашовым. Название метода отражает физическую основу, которой является ТМ-поле, имеющее вертикальную компоненту электрического поля. Переходной ТМ-процесс возбуждается круговым электрическим дипо-

лем, точнее сказать, приближенной реализацией такого источника системой радиальных линий. Согласно теории, развитой в главах 1 и 3, на дневной поверхности горизонтально-слоистой среды в квазистационарном приближении магнитное поле отсутствует, а фиксируется только радиальная компонента электрического поля. Эту ситуацию можно использовать различным способом. В практически развиваемой сейчас модификации (ЗВТ-М) производятся площадные наблюдения магнитного поля, само наличие которого связано с латеральными нарушениями геоэлектрического разреза. Таким образом, в такой модификации не определяется и не изучается горизонтально-слоистая структура. Хотя по аналогии с индуктивной можно охарактеризовать ЗВТ в целом, как неиндуктивную импульсную электроразведку, имея ввиду используемый базовый гальванический (неиндуктивный, ТМ) процесс, в ЗВТ-М тонкость состоит в том, что регистрируется все же индуктивный сигнал от вторичных источников (неоднородностей) (рис.8).

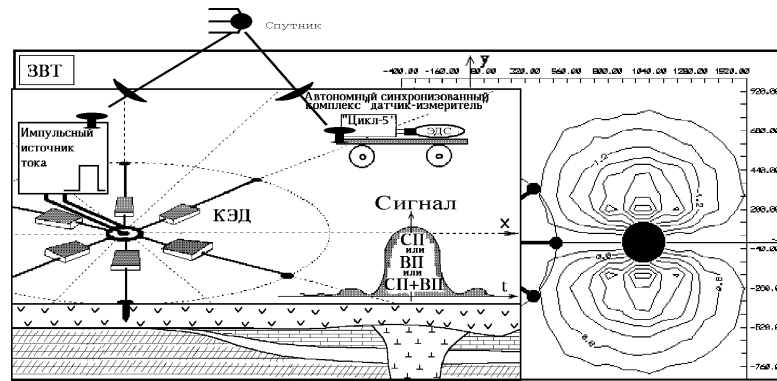


Рис. 8: Модификация ЗВТ с магнитным приемом - ЗВТ-М

История ЗВТ пока коротка и совпала с трудным периодом для российской геофизики и, особенно, для электроразведки. Тем не менее, проведены полевые работы с рудным и нефтяными объектами, создано уже второе поколение аппаратуры. Специфической частью этой аппаратуры является электронная система поддержания назначенных и равных токов в радиальных линиях установки КЭД.

В главе 5 описаны этапы создания и обоснования метода: первые полевые эксперименты с установкой КЭД, физическое моделирование, математическое моделирование, исследования влияний несовершенства реальной установки КЭД, вопросы глубинности, методика представления площадных данных ЗВТ-М и

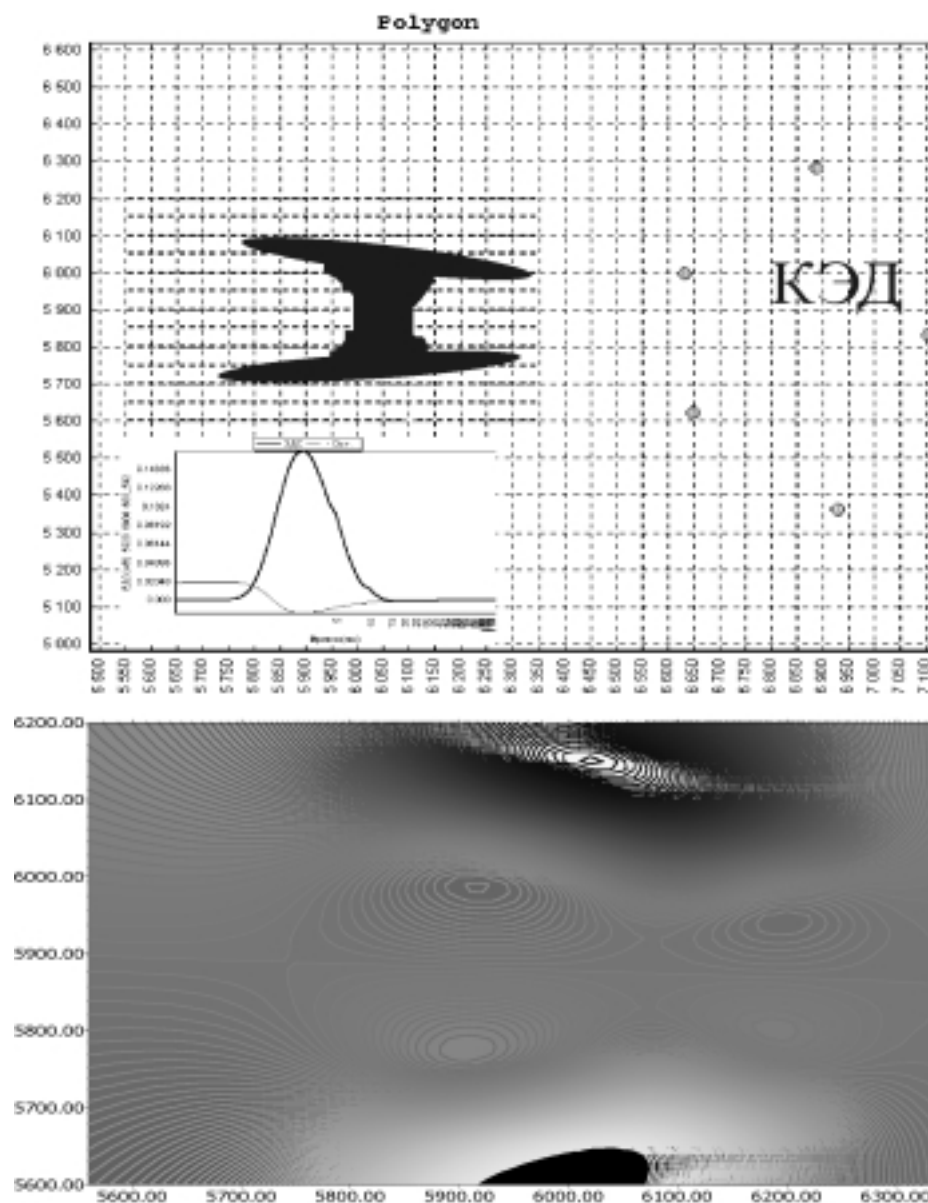


Рис. 9: Отображение неоднородности в площадном сигнале ЗВТ. Математическое моделирование. контур залежи и площадной сигнал ЗВТ на времени 5мс.

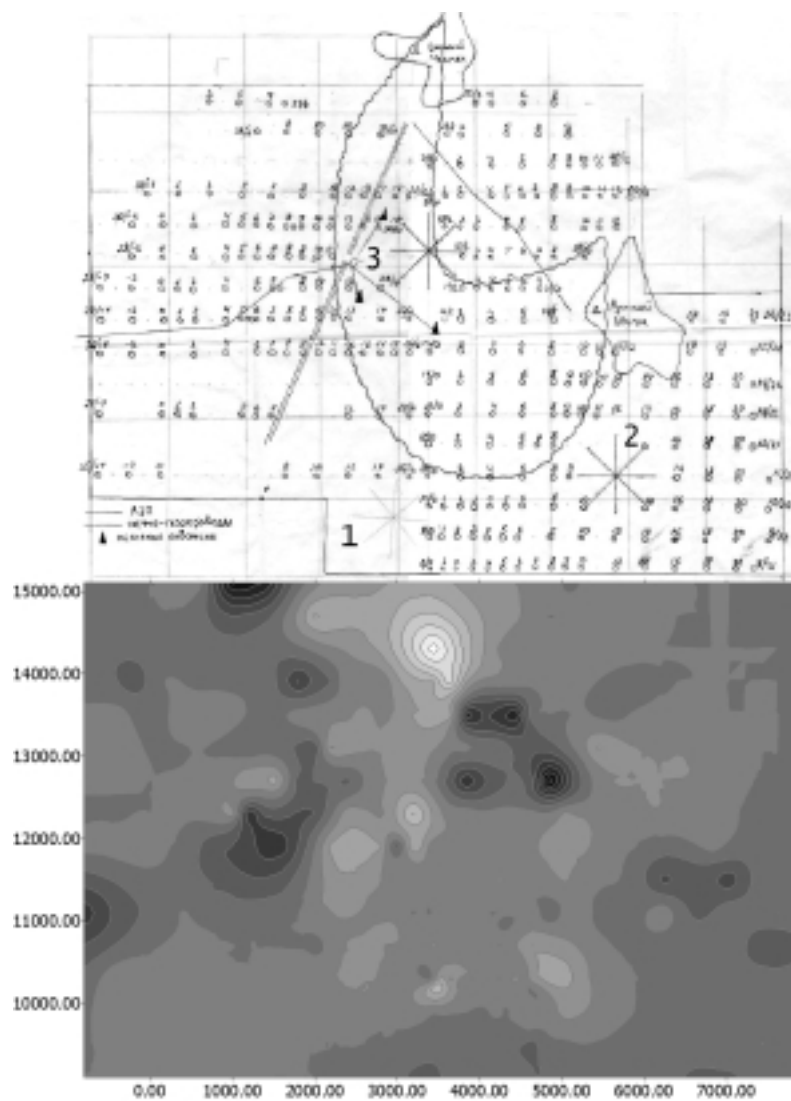


Рис. 10: Акбязовская залежь. Схема работ ЗВТ, предполагаемый контур залежи и площадной сигнал ЗВТ на времени 40мс.

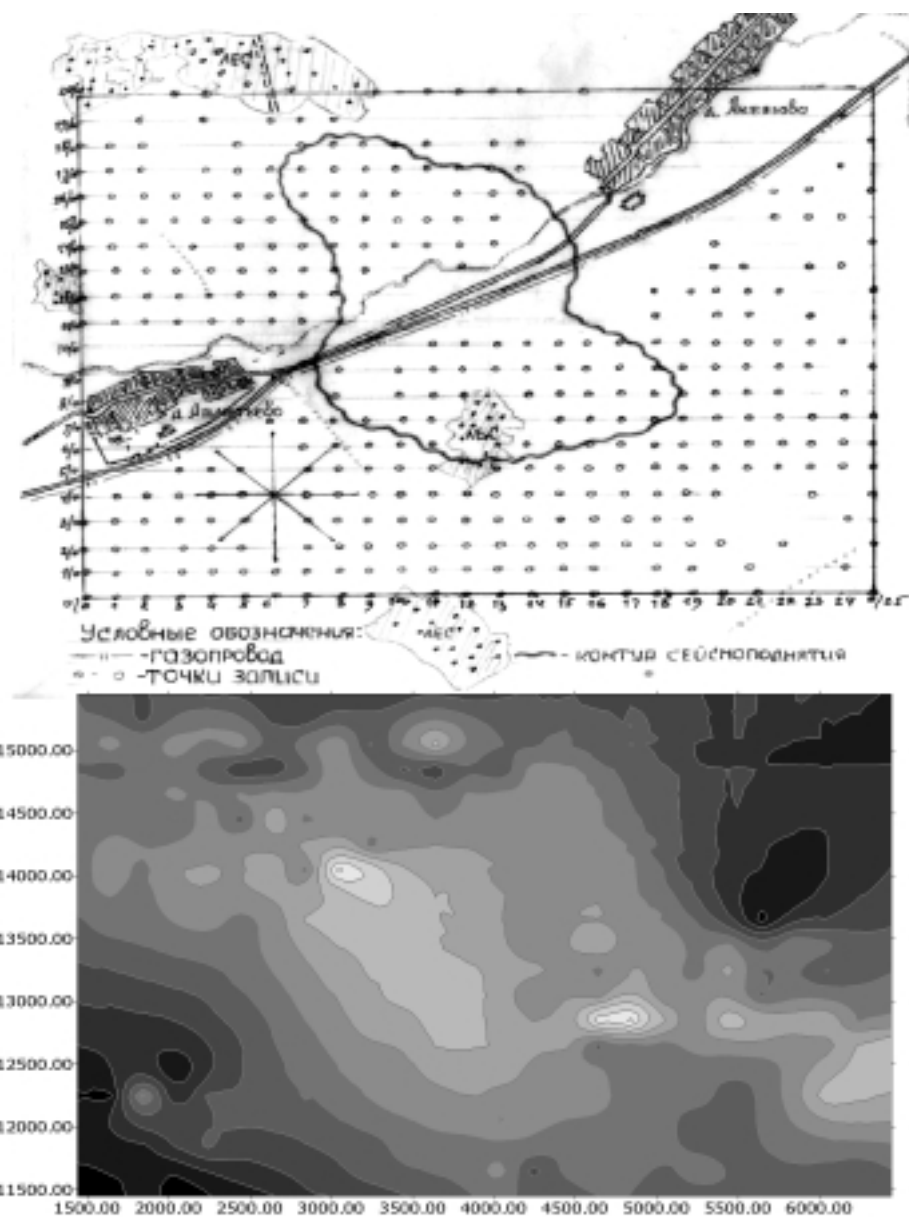


Рис. 11: Работы ЗВТ на Шуганской залежи нефти. Схема работ, предполагаемый контур залежи и площадной сигнал ЗВТ на времени 5мс.

методика интерпретации. На рис.9 приведен пример математического моделирования площадного магнитного сигнала ЗВТ (дан и пример сигнала ЗВТ-М на пикете), которое, разумеется, может быть только трехмерным и выполнено оперативными средствами (в борновском приближении). Рельеф площадного сигнала на фиксированном времени определяет форму глубинной неоднородности. В главе 5 также приведено полное описание действующей на сегодня технологии ЗВТ-М в целом.

Естественно, существенное место занимает обсуждение полевых результатов. Объем проведенных полевых работ пока невелик, но уже сейчас имеется положительный опыт на рудном (Украина), нефтяных (Татарстан) и кимберлитовых (Якутия) объектах. Наиболее значительны полевые работы, проводимые и в настоящее время, в Татарстане на нефтяных залежах с целью их зондирования. Важный результат состоит в том, что залежь хорошо проявляет себя в площадном сигнале ЗВТ-М. На рис.10 и рис.11 приведены схемы работ, предполагаемые контуры и отображения в сигнале ЗВТ-М Шуганской и Акбязовской залежей нефти (Восточный Татарстан).

Следует заметить, что модификация ЗВТ-М не исчерпывает всех возможностей, которые дает индукционное поле электрического типа и круговой электрический диполь. Применение этого источника позволяет по новому подойти к методике ВП, к зондированиям в море, сверхмощным зондированиям, малоглубинным зондированиям, к частотным зондированиям. В последнем случае имеется ввиду отсутствие собственного магнитного поля у кругового электрического диполя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общим результатом работы является развитие принципиального двуединства электроразведки с контролируемыми источниками, построение базовой теории и математического аппарата в дуальной форме и соответствующее расширение спектра технических средств. Конкретные результаты состоят в следующем:

1. Получено обобщающее решение задачи об установлении поля, возбуждаемого контролируемым источником в произвольной горизонтально-слоистой среде на основе разделения на ТЕ и ТМ-поле. Предлагаемая постановка и способ решения поглощают многолетние наработки в этой области и приводят математический аппарат ЗС к наиболее компактному и единообразному виду. Это достигается нижеперечисляемой совокупностью подходов и приемов.



а) Источник описан, как горизонтальное произвольное распределение стороннего тока.

б) Режим возбуждения произвольный, в частности, описываемый  $\delta$ -функцией и гармонический режим.

в) Источник учитывается в задаче, как дополнительное граничное условие.

г) Задача сводится к задаче определения вертикальных компонент магнитного и электрического поля. Потенциалы не вводятся, что сужает и упрощает аксиоматику задачи.

д) Применение в совокупности (а), (в) и (г) позволило разделить задачу на две независимые скалярные задачи – электрического типа, в которой "источником" является дивергенция распределения стороннего тока, и магнитного типа, в которой "источник" есть ротор стороннего тока.

ж) Одномерные задачи для магнитной и электрической мод решаются для гармонического режима и для становления двумя способами – в виде интеграла и ряда Фурье.

**2.** Получены выражения во временной области для поля полного процесса от вертикального магнитного диполя с учетом токов смещения, численно реализованные.

**3.** Получены эффективные алгоритмические средства оперативного прямого моделирования в осложненных геоэлектрических условиях и средства инверсии на основе сформулированного метода вторичных источников и теории возмущения:

а) интегральное определение матрицы чувствительностей горизонтально-слоистой модели в процессе установления, что имеет большое значение в аппарате инверсии;

б) декомпозиция суммарного отклика по послойным вкладам отдельных слоев;

в) приближенный учет влияния токов смещения, как пример применения метода вторичных источников и теории возмущения;

г) построение линеаризованных решений прямой задачи индуктивных ЗС различной размерности по распределению проводимости.

Все предложенные алгоритмы программно реализованы отчасти в комплексе ПОДБОР, отчасти в развивающемся математическом обеспечении томографии индуктивных ЗС.

**4.** Реализован еще один аппроксимационный подход, заключающийся в аппроксимации геоэлектрической модели неоднородной проводящей плоскостью. Подобная идеализация имеет смысл как модельное средство учета влияния проводящей неоднородной ВЧР. Такая модель среды позволяет в квазистационарном приближении свести задачу становления к двумерной задаче установления токов в плоскости. В результате, (совместно с В.М.Фоминим)

создана весьма оперативная программа расчета поля переходного процесса в неоднородной  $S$ -плоскости.

**5.** Развита (совместно с М.И.Эповым) новая, томографическая, способ интерпретации данных индуктивной импульсной электроразведки. Способ, в принципе, решает проблему оперативной обработки больших массивов, (возможно, разнородных) площадных данных при трехмерном подходе. Речь идет о дифракционной квазистационарной электромагнитной томографии в борновском приближении. В этой работе показана перспективность томографического подхода на синтетических и экспериментальных данных ЗС. Предварительные исследования показали, что проблема точности прямой задачи в линеаризованной постановке может решаться путем гибкого выбора параметров референтной модели и применения все больших объемов независимых данных.

**6.** Результатом многолетней работы (совместно с А.В. Злобинским) является программный комплекс ПОДБОР, предназначенный для интерактивной автоматизированной интерпретации данных ЗСБ-МПП. Особенность этого результата состоит в том, что посредством этого программного продукта многие (большая часть тех, что представлены в диссертации) теоретические и алгоритмические разработки нашли практическое, производственное применение. Электроразведочные работы, для обработки данных которых использован комплекс ПОДБОР, проводились с различными целями: нефть (Россия, Австралия), рудные объекты (Россия, Украина, Казахстан), поиски кимберлитовых тел (Россия), гидро-геологические исследования (Израиль, Йемен). Комплекс может применяться в морском, скважинном и аэровариантах электроразведки ЗСБ (МПП).

**7.** В рамках ТЕ-ТМ-подхода к теории и математическому аппарату электроразведки с контролируемыми источниками создан пакет программ MAGsoft для расчета полей становления основных типов источников для электроразведки: горизонтальный электрический диполь (смешанный гальвано-индуктивный источник смешанного же поля), вертикальный электрический диполь (гальвано-индуктивный источник ТМ-поля), вертикальный магнитный диполь (чисто индуктивный, только ТМ-поле), круговой электрический диполь (чисто гальванический, только ТЕ-поле). Единообразной алгоритмической основой пакета программ является синтез двух решений для устанавливающихся полей. Пакет программ MAGsoft уникален (по реализации дуального подхода) и имеет большое научно-методическое значение для электроразведки ЗС.

**8.** Впервые предложен, введен в теорию электроразведки и практически реализован источник нового типа – круговой элек-

трический диполь (КЭД), возбуждающий с дневной поверхности нестационарное поле только электрического типа. Появление такого источника означает реализацию принципиального двуединства электроразведки с контролируемыми источниками и является серьезной новацией в современной электроразведке.

**9.** Впервые систематически исследованы свойства устанавливаемого ТМ-поля, возбуждаемого круговым и вертикальным электрическими диполями. Показаны малоизвестные свойства процессов становления поля электрического типа. Самый общий результат исследований состоит в том, что использование ТЕ и ТМ-процессов (а не только индуктивного) позволило бы более успешно изучать электромагнитные свойства реальных сред.

**10.** В контексте свойств постоянного ТМ-поля рассматривалась также проблематика наземно-скважинной электроразведки (НСЭ) на постоянном токе при разведке и оконтуривании залежей углеводородов. В главе 3 приведены некоторые результаты, которые состоят:

- а) в развитии достаточно оперативного двухмерного математического моделирования на основе решения краевых задач оригинальным способом частичного разделения переменных;
- б) в построении методики приближенного учета колонны при математическом моделировании;
- в) в предложенном способе оконтуривания протяженных неоднородностей.

**11.** Весьма важным результатом является создание и развитие (в соавторстве с Б.П.Балашовым) принципиально нового метода электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ). Это метод основан на использовании нестационарного ТМ-поля, и его создание означает практическую реализацию провозглашенного в диссертационной работе подхода к электроразведке с контролируемыми источниками. Результаты, относящиеся к разработке нового метода весьма многообразны. Можно сформулировать две группы таких результатов:

- а) разработка и создание аппаратурно-методического комплекса для зондирования вертикальными токами с индуктивным приемом (ЗВТ-М);
- б) полевое опробование метода ЗВТ-М на различных объектах (рудное тело, кимберлитовые трубки, нефтяные залежи).

Интересные положительные результаты по оконтуриванию нефтяных залежей, например, дают новые перспективы для нефтяной электроразведки ЗС.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Балашов Б.П., Могилатов В.С. О разработке аппаратного комплекса электроразведочной системы зондирования вертикальными токами. // Геофизика. - 1996. - N 3. - с. 30-33.
2. Гольдман М.М., Могилатов В.С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально - слоистое полупространство // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике.- Сб. научных трудов ИГиГ СО АН СССР. - Новосибирск, 1978, - С.123-138.
3. Захаркин А.К., Могилатов В.С., Горошко Н.В. Первичная обработка материалов ЗСБ, полученных на аппаратуре "Цикл-2"// Результаты применения метода зондирования становлением поля в районах Сибирской платформы. - Труды СНИИГГиМС. - Новосибирск, 1987.- С. 120-125.
4. Могилатов В.С. Поздняя стадия становления электромагнитного поля, возбуждаемого погруженным электрическим диполем // Изв.АН СССР. Сер.:Физика Земли.-1976.-N8.-С.103-107.
5. Могилатов В.С. Математическое моделирование задач наземно-скважинной электроразведки // Геология и геофизика. - 1983. - N 3. - С. 111-116.
6. Могилатов В.С. Расчет поля источника, заземленного в обсаженной скважине // Геология и геофизика. - 1992. - N 5. С. 133-141.
7. Могилатов В.С. Математическая модель водонефтяного контакта в наземно-скважинной электроразведке // Геология и геофизика. - 1994. - N 2. С. 150-155.
8. Могилатов В.С. Круговой электрический диполь – новый источник для электроразведки // Изв.РАН. Сер.: Физика Земли.- 1992.- N 6.- с 97-105.
9. Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика. - 1993. - N 3. - С. 108-117.
10. Могилатов В.С. Индуктивный, смешанный и гальванический источники в электроразведке становлением поля // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997.- N 12. - С. 42-51.
11. Могилатов В.С. Возбуждение электромагнитного поля в слоистой Земле горизонтальным токовым листом // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1998. - N 5. - С. 45-53.
12. Могилатов В.С. Элементы математического аппарата зондирования становлением поля при учете токов смещения // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997. - N 9. - С. 60-66.

13. Могилатов В.С. Теоретический анализ возможностей зондирования вертикальными токами (ЗВТ). // Геология и геофизика. - 1996. - Том 37, N 7. - С.112-119.
14. Могилатов В.С. Нестационарное поле кругового электрического диполя в однородной Земле. // Геология и геофизика. - 1997.- Т.38, N 11.- С. 1849-1855.
15. Могилатов В. С. Вторичные источники и линеаризация в задачах геоэлектрики. // Геология и геофизика.-1999.- N 7. - С.1102-1108.
16. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ) // Изв.РАН. Сер.:Физика Земли.- 1994.- N 6.- С.73-79.
17. Могилатов В.С., Балашов Б.П. Зондирование вертикальными токами – качественный шаг в развитии индукционной электроразведки //Разведочная геофизика. - 1998. - Вып. 4. - 60 с.
18. Могилатов В.С., Гендельман А.М. О возможности использования обсаженных скважин в наземно-скважинной электроразведке на нефть и газ в условиях Сибирской платформы // Геология и геофизика. - 1983. - N 12. - С. 99-105.
19. Могилатов В.С., Гендельман А.М. Об экранирующем действии нефтяной залежи при электроразведке // Изв. АН СССР. Сер.: Физика Земли. - 1985. - N 6. - С.101-106.
20. Могилатов В.С., Горошко Н.В. Становление поля от источника, заземленного в обсаженной скважине // Геология и геофизика. - 1986. - N 12. - С. 101-105.
21. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Поле кругового электрического диполя (КЭД) при постоянном токе // Изв.РАН. Сер.: Физика Земли.-1995.-N11.-С.25-29.
22. Могилатов В.С., Фомин В.М. Пленочное моделирование в методах МПП и ЗС // Изв.РАН. Сер.:Физика Земли.- 1992. - N7. - С.62-66.
23. Могилатов В. С., Эпов М. И. Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Изв.РАН, Сер.:Физика Земли.-2000.-N1.
24. Могилатов В. С., Эпов М. И., Исаев И. О. Томографическая инверсия данных ЗСБ-МПП // Геология и Геофизика.- 1999.- N 4. - С.637-644.
25. Рабинович Б.И., Могилатов В.С. Становление поля погруженного вертикального магнитного диполя // Геология и геофизика. - 1981. - N 3. - С. 88-100.
26. Рабинович Б.И., Могилатов В.С. Выбор питающей установки в нефтепоисковой наземно-скважинной электроразведке // Методика и результаты изучения Сибирской платформы геофизическими методами.- Труды СНИИГГиМС. - 1984.- С.72-75.

27. Рабинович Б.И., Гендельман А.М., Могилатов В.С. Выбор методики наземно-скважинной электроразведки на постоянном токе при оконтуривании нефтегазовой залежи // Геология и геофизика. - 1985.- № 9. - С. 100-105.
28. Патент РФ № 1062631. Способ геоэлектроразведки / Могилатов В.С. 1982. Опубликовано 23.12.83. Бюл. № 47.
29. Патент № 1799512(СССР). Способ геоэлектроразведки / Тригубович Г.М., Хаов Ф.М., Могилатов В.С.
30. А.с. № 1760873(СССР). Способ геоэлектроразведки / Тригубович Г.М., Захаркин А.К., Могилатов В.С.
31. А.с. № 1664042. Способ определения края протяженной геоэлектрической неоднородности / Могилатов В.С. 1989.
32. Патент РФ № 2028648. Способ прямых поисков геологических объектов и устройство для его осуществления / Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1992. Опубликовано 09.02.95. Бюл. № 4.
33. Патент РФ № 2084929. Способ геоэлектроразведки / Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1993. Опубликовано 20.07.97. Бюл. № 20.
34. Патент РФ № 2112995. Способ прямых поисков локальных объектов / Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1995. Опубликовано 10.06.98. Бюл. № 16.
35. Патент РФ № 2111514. Способ прямого поиска геологических объектов и устройство для его осуществления / Балашов Б.П., Могилатов В.С., Захаркин А.К., Саченко Г.В., Секачев М.Ю. 1996. Опубликовано 20.05.98. Бюл. № 14.
36. Патент РФ № 2116658. Способ прямого поиска локальных объектов на шельфе Мирового океана и устройство для его осуществления в открытом море / Балашов Б.П., Могилатов В.С. 1995. Опубликовано 27.07.98. Бюл. № 21.
35. Goldman M., Mogilatov V. and Rabinovich M., 1996, Transient response of a homogeneous half space with due regard for displacement currents // Journal of applied geophysics. - 1996. - Vol.37.- Pp. 291-305.
36. Mogilatov V., 1996, Excitation of a half-space by a radial current sheet source // Pure and applied geophysics. - Vol. 147, No.4. pp.763-775.
37. Mogilatov V. and Balashov B., 1996, A new method of geo-electrical prospecting by vertical electric current soundings // Journal of applied geophysics. - Vol. 36. pp.31-41.