

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
им. А.А. ТРОФИМУКА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

На правах рукописи

ПОТАПОВ Владимир Владимирович

**ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЗОНДИРОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ (ЗВТ)**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., В.С. Могилатов

НОВОСИБИРСК

2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ЗВТ	14
1.1 Зондирования вертикальными токами (ЗВТ).....	14
1.2 Методические особенности ЗВТ	25
1.2.1 ЗВТ и метод чистой аномалии.....	25
1.2.2 Сигналы ЗВТ и горизонтально-слоистый разрез.....	26
1.2.3 Ранние времена ЗВТ	28
1.3 Специфика обработки площадных данных ЗВТ-М.....	29
1.3.1 3D-сигнал ЗВТ. Двуполярность сигнала ЗВТ-М	29
1.3.2 3D-сигнал ЗВТ. Нормировка временных и профильных срезов	31
1.4 1D-сигнал ЗВТ. Становление электрического поля.....	33
ГЛАВА 2 АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПЛОЩАДНЫХ ДАННЫХ МЕТОДА ЗВТ-М И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	34
2.1 Этапы обработки данных метода ЗВТ-М.....	34
2.1.1 Разработка специализированных алгоритмов обработки данных применительно к ЗВТ-М (автоматическая нормировка данных, совмещение данных от нескольких КЭД, автоматическое построение профильных разрезов).....	35
2.1.2 Реализация алгоритмов обработки в программном комплексе «ЗаВеТ»	40
2.1.3 Выводы	47

2.2	Примеры обработки экспериментальных данных полученных методом ЗВТ-М с использованием созданного программного обеспечения	48
2.2.1	Экспериментальные работы по оконтуриванию нефтяной залежи (республика Татарстан).....	48
2.2.2	Экспериментальные работы в пределах Норильского рудного поля.....	61
2.3	Выводы.....	71

ГЛАВА 3 ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ С ИЗМЕРЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА 72

3.1	Становление электрического поля КЭД.....	74
3.2	Влияние конфигурации источника и приемника на измеряемый электрический сигнал в установке КЭД-MN	82
3.2.1	Сравнение электрических сигналов от идеальной и реальной установки КЭД	84
3.2.2	Влияние на измеряемый сигнал разноса приемной линии MN и КЭД.....	85
3.2.3	Влияние длины приемной линии MN на измеряемый сигнал	89
3.2.4	Влияние на измеряемый сигнал угла между ближайшим лучом установки и приемной линией, расположенной строго в радиальном направлении	94
3.2.5	Влияние угла поворота приемной линии вокруг своей оси на измеряемый сигнал.....	100
3.2.6	Выводы	103
3.3	Сравнение установок КЭД-MN и АВМN.....	105
3.3.1	Первый полевой эксперимент	106

3.3.2 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и АВМN при изменении поляризационных параметров	109
3.3.3 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и АВМN при изменении глубины тонкого слоя.....	115
3.3.4 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и АВМN при изменении сопротивления тонкого слоя.....	119
3.4 Выводы.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
ЛИТЕРАТУРА	126

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – метод зондирования вертикальными токами (ЗВТ) на предмет создания специализированных алгоритмов обработки и интерпретации полевых измерений вертикальной магнитной компоненты и определения информативности радиальной электрической компоненты поля.

Актуальность исследования. В 90-ые годы сотрудниками Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья МПР РФ (СНИИГГиМС) и Института геофизики Сибирского отделения РАН (ИГФ СО РАН) был создан метод наземной электроразведки – зондирования вертикальными токами (ЗВТ). Использован принципиально новый по способу возбуждения поля источник – круговой электрический диполь (КЭД), позволяющий реализовать площадные исследования с закрепленным источником. Метод способен решать задачи выделения локальных неоднородностей в горизонтально-слоистом разрезе.

При оконтуривании протяженных по площади геоэлектрических объектов методом ЗВТ возникали сложности, как при проведении полевых работ, так и при интерпретации данных. Не было возможности объединить данные от нескольких источников КЭД, а с помощью одного источника невозможно получить данные со всей исследуемой площади.

Многие этапы обработки, такие как нормировка площадных и профильных сигналов, проводились вручную, что являлось нежелательным субъективным фактором и требовало достаточно много времени.

Кроме того, совершенно не использовались данные радиальной электрической составляющей поля, в которой содержится информация об одномерной вмещающей среде, и также о процессах вызванной поляризации (ВП).

Исходя из выше сказанного, **представляется актуальным** усовершенствование и автоматизация процедур обработки данных ЗВТ таким

образом, чтобы имелась возможность учитывать и совмещать данные от нескольких установок КЭД, с целью ускорения процесса обработки и исключения субъективного человеческого фактора; также актуально определить степень информативности радиальной электрической составляющей поля.

Цель работы – повысить достоверность и информативность метода ЗВТ, сократить материальные и временные затраты при проведении полевых работ, обработке и интерпретации данных метода ЗВТ.

Научная задача исследований – усовершенствовать программно-алгоритмический комплекс обработки и интерпретации данных ЗВТ путем разработки алгоритмов и программ на основе анализа особенностей сигналов ЗВТ и развить методику интерпретации посредством определения информативности радиальной электрической составляющей поля.

Поставленная задача решалась поэтапно:

1. Разработать алгоритмы для обработки площадных данных с учетом специфики сигналов метода ЗВТ при регистрации вертикальной магнитной составляющей поля.
2. Программно реализовать разработанные алгоритмы.
3. Определить информативность данных при измерении радиальной электрической составляющей поля.
4. Разработать методические рекомендации по проведению полевых работ при измерении радиальной электрической составляющей поля.

Методы исследований и фактический материал

Теоретической основой является теория процессов установления электрического и магнитного полей, возбуждаемых круговым электрическим диполем в одномерных и трехмерных средах, разработанная Могилатовым В.С. (1993). Эта теория основана на работах таких известных ученых, как А.Н. Тихонов, С.М. Шейнман, Л.Л. Ваньян, П.П. Фролов,

В.И. Дмитриев, Б.С. Светов, J.R. Wait, А.А. Кауфман, Г.М. Морозова, Л.А. Табаровский, М.И. Эпов.

Основные методы исследования – анализ полевых данных метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ); методы обработки, представления и визуализации множественных площадных данных; обработка экспериментальных данных; математическое моделирование; сравнительный анализ результатов расчетов, полученных для различных моделей сред и для различных параметров генераторно-измерительного комплекса.

В качестве фактического материала при работе над диссертацией использовались полевые материалы экспериментальных и производственных работ методом ЗВТ-М, полученные НПФ «ЗаВеТ-ГЕО» (г. Новосибирск) совместно с Якутским научно-исследовательским геологическим предприятием Центрального научно-исследовательского геолого-разведочного института (г. Мирный), НПУ «Казаньгеофизика» в республике Татарстан, предприятием «Норильскгеология» в Норильском районе, в Новосибирской области, в Казахстане при непосредственном участии автора.

Для проведения математического моделирования и верификации данных, полученных в результате моделирования, использовались расчетные математические процедуры и программы, разработанные в ИНГГ СО РАН Эповым М.И., Антоновым Е.Ю. и Могилатовым В.С.

Основные новые научные результаты, полученные лично автором:

Усовершенствована и автоматизирована обработка полевых данных:

- Разработан алгоритм для автоматической нормировки площадных сигналов ЗВТ-М, учитывающий падение сигнала с увеличением расстояния от источника.
- Разработан алгоритм автоматического совмещения данных ЗВТ-М от нескольких источников.

- Разработан алгоритм построения профильных сигналов ЗВТ-М.
- Все разработанные алгоритмы реализованы в программно-алгоритмическом комплексе «ЗаВеТ-М».

На основе численного моделирования получены важные методические рекомендации и выводы:

- Показано, что угол радиального направления в установке КЭД-MN практически не влияет на измеряемый сигнал.
- Показано, что угол поворота вокруг своей оси линии MN в установке КЭД-MN не должен превышать 10 градусов, для исключения значительного искажения измеряемого сигнала.
- Установлено, что чувствительность к изменению геоэлектрических параметров тонкого слоя (сопротивление, глубина, поляризационные параметры слоя) для установок КЭД-MN и АВМN одинакова.

Защищаемые научные результаты

1. Разработаны и программно реализованы алгоритмы обработки данных метода ЗВТ-М для нормировки площадных и профильных сигналов ЗВТ в зависимости от расстояния и времени, сшивки полевых данные от нескольких источников КЭД, проведения предварительной обработки полевых данных.

2. Численно показано, что установка КЭД-MN по сравнению с установкой АВМN является таким же эффективным средством определения геоэлектрических параметров среды (сопротивление, глубина залегания и поляризационные параметры слоя). На основе численного моделирования процессов становления поля в методе ЗВТ разработаны методические рекомендации по проведению полевых работ с использованием установки КЭД-MN, учитывающие геометрические факторы генераторно-измерительного комплекса.

Достоверность полученных научных результатов определяется следующим.

Разработанные алгоритмы и их программная реализация были опробованы на большом количестве полевого материала. Работы методом ЗВТ-М проводились на современной, разработанной в конце-90-ых годов, аппаратуре в Татарстане, в Якутии, в Норильском районе, в Австралии, в Италии и т.д. Результаты обработки и интерпретации полевых данных для всех районов исследований хорошо согласуются с геологической априорной информацией.

Верификация программного обеспечения для численного моделирования проводилась с помощью сравнительного анализа расчетов по программам, предоставленным различными авторами (Е.Ю. Антонов, В.С. Могилатов и др.). Были выполнены тестовые расчеты для известных установок и различных моделей среды. Выявлено хорошее совпадение сравнительных расчетов.

Теоретическая и практическая значимость.

В работе отражены методические особенности ЗВТ, как принципиально нового метода наземной электроразведки: влияние вмещающей среды, диапазон времени регистрации, характер принимаемого сигнала.

Разработаны приемы и алгоритмы нормировки площадных сигналов ЗВТ, совмещения данных от нескольких установок КЭД, построения профильных сигналов ЗВТ, что повышает информативность метода за счет расширения площади исследования.

Реализация этих алгоритмов в программном комплексе обработки данных «ЗаВеТ-М» и значительное усовершенствование интерфейсной части этого программного комплекса позволили повысить эффективность оперативной обработки данных, за счет уменьшения временных и материальных затрат при проведении полевых работ, практически полной

автоматизации процесса построения в реальном времени площадных и профильных сигналов ЗВТ.

Сравнительный анализ сигналов, полученных в результате математического моделирования, для двух установок КЭД-MN и АВМN показал эффективность использования установки КЭД-MN в качестве источника при изучении геоэлектрических параметров среды. Преимущество установки КЭД-MN в том, что она дает возможность реализовать площадной сбор данных при изучении этих параметров, что, в свою очередь, увеличивает информативность полевых работ за счет увеличения площади измерений при стационарно расположенном источнике поля и, соответственно, сокращает временные и финансовые затраты на проведение этих работ.

На основе результатов математического моделирования даны методические рекомендации по взаимному расположению источника (КЭД) и приемника (линия MN) при проведении полевых работ, которые позволят избежать искажений полевых данных. Выполнение этих рекомендаций дает возможность значительно повысить достоверность измерений радиальной электрической составляющей поля.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: EAGE 64-th Conference & Exhibition – Stavanger, Norway, 2003; Международной научно-практической геолого-геофизической конкурса-конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика”, Санкт-Петербург, 2003, 2005; Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь», 2006; Международной конференции «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем» Киев, 2009 и др.

Полученные научные результаты достаточно полно изложены в 10 публикациях, из них в ведущих рецензируемых научных журналах,

определенных Высшей аттестационной комиссией – 2 («Геофизика», 2003, №5; «Физика Земли», 2007, №5), 3 – статьи в научных журналах, 5 – материалы российских и международных конференций и семинаров.

Исследования, изложенные в диссертационной работе, проводились в соответствии с планом НИР Института геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, в рамках программ №01200101571 в 2002-2003 г., № 01200407248 в 2004-2005 г.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории электромагнитных полей и Лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН Е.Ю.Антонову, И.Н. Ельцову, Ю.А. Дашевскому, Г.М.Морозовой, Н.Н. Неведровой, В.Н. Глинских, Е.В. Павлову за помощь, советы и рекомендации, которые были очень полезны. Хотелось бы отметить плодотворное обсуждение результатов и внимательное отношение к работе Н.О. Кожевникова.

Автор многим обязан сотрудникам СНИИГГиМС Б.П.Балашову, М.Ю.Секачеву, Г.В.Саченко, разработчикам аппаратуры для ЗВТ, с которыми автор совместно участвовал в полевых работах.

Автор считает своим долгом отметить плодотворное сотрудничество с организациями ЯНИГП ЦНИГРИ (г. Мирный), «Казаньгеофизика» (г. Казань), фирмой «GEOINVEST» (Италия), с которыми проводились совместные полевые исследования.

Автор глубоко признателен академику РАН М.И. Эпову за внимание к работе и предоставленные благоприятные условия.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, доктору технических наук В.С. Могилатову за постоянное внимание и корректное научное руководство.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения содержит 133 страницы машинописного текста, 62 рисунка. Библиография содержит 63 наименования.

Расположение материалов в диссертации соответствует поставленной задаче в рамках трех основных направлений:

- анализ методических основ ЗВТ, перспектив и проблем развития данного метода электроразведки;
- развитие алгоритмов обработки данных ЗВТ-М, представления, визуализации и интерпретации этих данных. Создание соответствующего программного обеспечения, примеры применения при практических работах;
- исследование эффективности данных радиальной электрической компоненты поля при изучении геоэлектрических параметров среды.

Во введении поставлена цель работы, обоснована ее актуальность, сформулированы задачи исследования и представлены защищаемые научные результаты. Определена научная новизна и личный вклад автора, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе приведен краткий обзор современного состояния методов зондирования становлением, определено место метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ) с использованием нового типа источника – кругового электрического диполя. Далее рассмотрены особенности обработки и интерпретации полевых данных метода ЗВТ и актуальные проблемы.

Во второй главе описаны новые алгоритмы обработки площадных данных ЗВТ, такие как: автоматическая нормировка площадных сигналов, совмещение данных от нескольких источников, автоматическое построение профильных сигналов ЗВТ. Показана реализация этих алгоритмов в программе «ЗаВеТ». Также приведены примеры обработки результатов

полевых экспериментов в различных регионах с использованием программного обеспечения на базе разработанных алгоритмов.

В третьей главе на основе результатов математического моделирования рассмотрены особенности синтетических электрических сигналов ЗВТ, даны методические рекомендации по проведению полевых работ с использованием установки КЭД–MN, показана эффективность использования установки КЭД–MN при изучении геоэлектрических параметров среды по сравнению с установкой АВМN.

В заключении подведены итоги, показаны методические и экономические преимущества от практического использования результатов проведенного исследования, а также намечены дальнейшие пути исследований, направленные на повышение эффективности электромагнитных зондирований.

Глава 1 ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ЗВТ

1.1 Зондирования вертикальными токами (ЗВТ)

Электроразведка с управляемыми (контролируемыми) источниками дважды подвергалась наиболее радикальным модификациям. Первая состояла в переходе от постоянного тока к гармоническому возбуждению. Индукционный режим позволил проникнуть в подэкранную толщу и использовать технологичные незаземляемые элементы приемно-питающей установки.

Второй принципиальный шаг был сделан, когда более полувека назад возник (А.Н.Тихонов [53], 1946; С.М.Шейнман [57], 1947) метод установления электромагнитного поля (зондирования становлением – ЗС) и вдохнул новую жизнь в электроразведку. Метод позволял делать тонкие измерения при выключенном источнике и получать информацию о подэкранной толще вследствие индуктивного проникновения. Метод ЗС, после некоторого периода накопления опыта измерений слабого переходного сигнала в полевых условиях, блестяще показал себя в таких классических задачах электроразведки, как выявление локального проводящего объекта (рудная электроразведка) и определение параметров горизонтально-слоистого разреза (структурная электроразведка), показывая, при этом, большую глубинность при работе в ближней зоне. Весьма привлекательной была и возможность использования незаземленных источников и приемников.

Казалось, перспектива создания мощного производственного метода, который сможет составить конкуренцию сейсморазведке, реальна. Очевидны были и контуры технологии – устройство мощного закрепленного источника (петли или линии) и быстрые площадные измерения посредством бесконтактных, компактных датчиков. Попытки реализации такой технологии продолжались до кризисных 90-ых годов. Менялись названия

(«многоразносные...», «площадные...», «аэровариант», «многоканальные...», «с закрепленным источником»), имитировались технологии сейсморазведки («многократные перекрытия»). Проектировалась соответствующая аппаратура («Цикл-24») и разрабатывались мощные источники («Полигон», МГД-генератор) – казалось неизбежным создание площадной методики с закрепленным источником. Но мы теперь можем подвести лишь отрицательный итог – такой производственный метод так и не был создан. Всякий раз неразрешимой проблемой была интерпретация полученного площадного многоразносного материала.

Известно, что применение электроразведки для структурных исследований становится событием все более редким и никакой конкуренции сейсморазведке не составляет. Есть, разумеется, объективные объяснения успеху сейсмического метода, но почему все же ЗС, «вначале обещавшие успех», не дали ожидаемого от них результата? Дело в том, что, например, в структурной электроразведке упомянутая выше задача (определение параметров горизонтально-слоистого разреза), великолепно решаемая ЗС, сменилась на совсем другую – прослеживание слабых неоднородностей в этом самом разрезе. Метод ЗС, как физический эксперимент, был вполне адекватен первой задаче – регистрируемый переходной сигнал целиком определяется этими самыми параметрами. Но ЗС явились весьма плохим экспериментом для новой задачи – его высокочастотный сигнал по-прежнему определяется вмещающей толщей, а искомые объекты привносят в сигнал лишь слабые изменения.

Проиллюстрируем эту ситуацию на модельном примере. На рис.1.1 представлена серия кривых становления для разнесенной установки «петля-петля» (проводящий пласт $3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ перекрыт плохопроводящей толщей в 400 м). Разнос меняется от 500 до 1200 м . На разносах 850 и 900 м мы наблюдаем в окрестности времени 1 мс резкий импульсный всплеск (шириной около 0.4 мс) и всего три перехода через 0 . Удивительно, но такие примеры даже не

были известны разработчикам площадных методик с закрепленным источником. Обычно бытует представление, что кривая разнесенных зондирований должна иметь только один переход через ноль. Однако эти кривые, полученные в системе ПОДБОР [36], подтверждены расчетами по программе ЭРА [60], а также и физическим моделированием (А.К.Захаркин [12]).

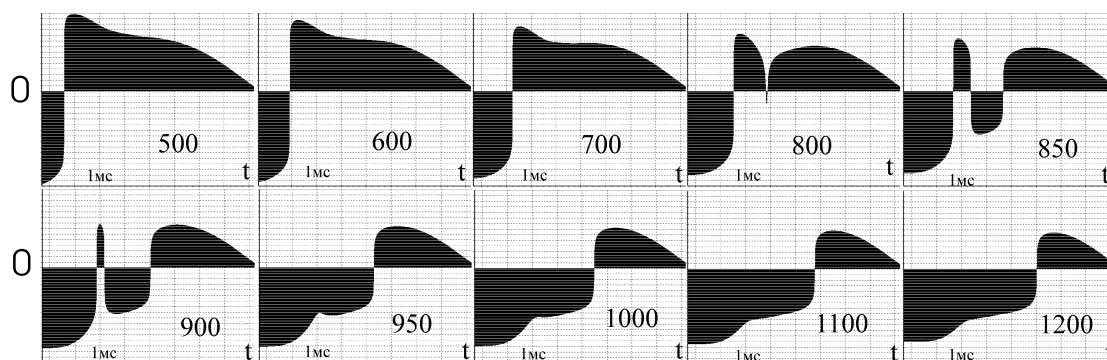


Рис. 1.1. Многозначные кривые ЗС

На таком изменчивом фоне, определяемом геометрией установки и вмещающей толщей, определять еще и некие слабые латеральные нарушения невозможно. Когда-то в аналогичной ситуации геоэлектрики приняли решение отключить источник, вместо того, чтобы пытаться учесть его и снять влияние при измерениях или в обработке. В настоящую эпоху мы нуждаемся в том, чтобы сделать следующий шаг в развитии электроразведки – реально, на физическом уровне устранить в сигнале отклик вмещающей толщи.

Интуитивные представления о богатстве взаимодействия электромагнитного поля и геосреды вовсе не оправдываются в существующих модификациях ЗС. Например, хорошо известно, что поле индуктивного (т.е. возбуждающего среду индуктивно, не гальванически) наземного источника создает только горизонтальные токи. Это значит, что анизотропия не ощущается этим полем. Крайнее выражение этого эффекта – возможность представления среды набором проводящих пластин. Это все

широко известно, но ведь это означает и ограниченность индуктивного метода исследования геосреды.

Для того, чтобы понять, имеются ли в нашем распоряжении еще не использованные резервы, обратимся к совершенно классической ситуации и рассмотрим поле заземленной электрической линии в режиме постоянного тока. Такой источник создает в Земле распределение электрического поля, которое, собственно, и используется в методах постоянного тока, но также имеется практически независимое от геосреды, и никак не используемое в этих методах постоянное, магнитное поле токового отрезка (рис. 1.2а).

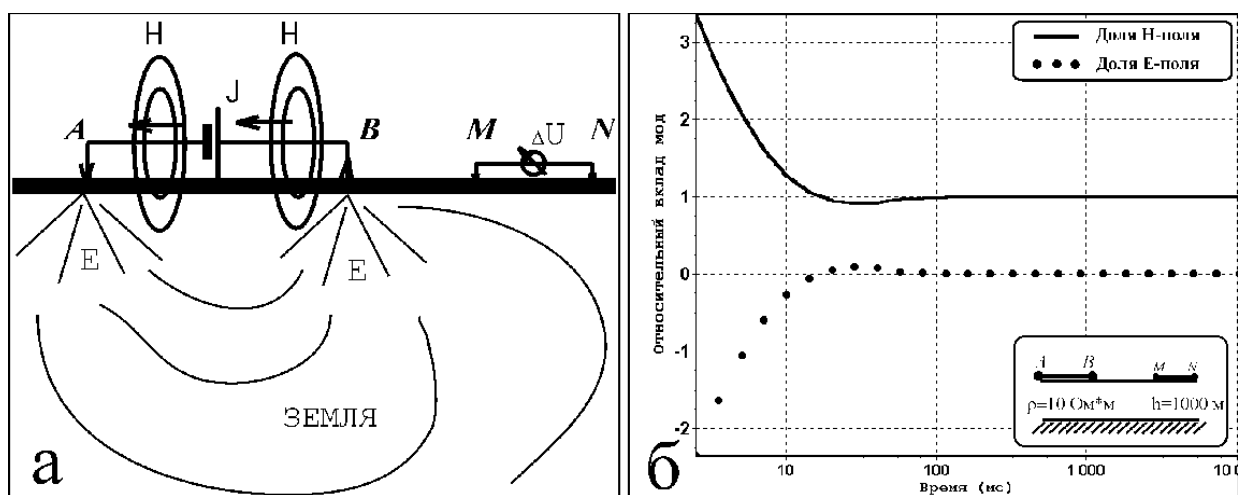


Рис.1.2. Вклад H -поля и E -поля в сигнал установления в установке ABMN
а) распределение токов и полей в установке ABMN, б) величина E - и H -полей в суммарном сигнале от установки ABMN

Соответственно, при выключении тока в источнике, в Земле возбуждаются два переходных процесса – установление изначального распределения тока и индуктивное возбуждение и последующее затухание вихревого тока. Другими словами, речь идет об установлении поля электрического типа (E -поля) и поля магнитного типа (H -поля).

Хорошо известно, что компоненты устанавливающегося поля заземленной линии в поздней стадии зависят от суммарной продольной проводимости разреза и спад происходит по степенному закону [54] – все, в основном, так же как и для поля петли, которая является источником поля

чисто магнитного типа. Вполне может сложиться мнение, что это происходит просто из-за схожего поведения Е- и Н-полей. Однако причина другая – Е-поле затухает много быстрее (экспоненциально в среде с изолирующим основанием) и остается только Н-поле [30]. Свойства Е-поля совершенно иные, в частности, процесс становления всегда зависит от вертикальной структуры среды и определяется как продольными, так и поперечными сопротивлениями на всех стадиях процесса. На рис. 1.2б представлены для режима становления относительные вклады Н-поля и Е-поля в суммарное поле для установки *ABMN*. В начальной стадии вклады примерно одинаковы и имеют разные знаки, в последней стадии поле горизонтального электрического диполя определяется становлением поля магнитного типа.

Чтобы в поздней стадии становления иметь значительный вклад поля электрического типа, нужна специальная конфигурация возбуждающего стороннего тока. Но поскольку применение линии и петли является экспериментальной основой индукционной геоэлектрики с контролируемыми источниками, то приходится констатировать, что такие геоэлектрические исследования носят односторонний характер, поскольку используют только поле магнитного типа.

Можно сказать, что когда стали использовать гармонический или импульсный режим источника вместо постоянного, то это была не только смена режима и не столько, а это обернулось сменой типа используемого поля. Конечно, были получены удобства применения незаземляемого источника (петли) и возможность индуктивного проникновения в подэкрannую толщу, но все-таки – был ли это безусловный прогресс? Методы постоянного тока, использующие Е-поле, хотя и постоянное, вовсе не умерли, но, напротив, успешно развиваются в многоэлектродные системы.

Характерные свойства Е-поля в процессе становления впервые заявили о себе еще в известной работе А.Н. Тихонова и О.А. Скугаревской [54], в которой обнаружилась экспоненциально затухающая со временем

составляющая в z-компоненте вектора-потенциала. Поскольку авторов интересовала поздняя стадия становления поля, возбуждаемого горизонтальным электрическим диполем, то такой составляющей они пренебрегали и физическая подоплека не обсуждалась. В последствии сложившаяся практика применения линии и петли долгое время держала «в тени» переменное поле электрического типа, мотивы и возможности его использования.

Поля магнитного и электрического типа есть объективная реальность, форма существования электромагнитного поля в слоистой одномерной Земле и взаимодействия с нею. Возбуждение каждой из поляризаций электромагнитного поля связано со свойствами источника. Соответственно, можно выстроить формальное описание контролируемой индукционной (в частности, импульсной) наземной геоэлектрики в некотором симметричном виде, которое оказывается весьма эффективным.

Предусмотрим все многообразие возможных различных питающих установок, располагаемых на дневной поверхности, введя распределение поверхностной плотности (в А/м) стороннего тока, меняющегося синхронно – $\vec{j}_c(x, y) \cdot q(t)$. Такое описание источника включает в себя традиционные питающие установки, образованные отрезками провода и точечными заземлениями, но также и менее привычные установки с распределенными проводниками и заземлениями. Например, для двух основных источников в наземной электроразведке – горизонтальная заземленная по концам линия (ГЭЛ) и токовая петля – поверхностная плотность определяется следующим образом:

$$\text{ГЭЛ:} \quad j_x^{cm}(x, y) = I \cdot \delta(y) \cdot [U(x + dx_0/2) - U(x - dx_0/2)],$$

$$\text{петля:} \quad j_\varphi^{cm}(r) = I \cdot \delta(r - a),$$

где $U(x)$ – функция Хевисайда, $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, dx_0 – длина ГЭЛ, a – радиус токовой петли.

Примем в качестве базовой модели среды одномерную, горизонтально-однородную модель и применим уравнения Максвелла с соответствующими условиями. Напомним, что поле электрического типа определяется отсутствием вертикальной компоненты магнитного поля, а поле магнитного типа – отсутствием вертикальной электрической компоненты. Поэтому, сведя задачу к определению вертикальных компонент, мы легко (подробно в [27]) получим решение для любой компоненты поля ($P_k=E_{x,y,z}$, $H_{x,y,z}$) в виде линейного двучлена вида:

$$P_k = F\{a_k F^*\{\text{rot}_z \vec{j}_c\}X + b_k F^*\{\text{div} \vec{j}_c\}V\} \quad , \quad (1.1)$$

где, $F\{\}$ и $F^*\{\}$ означают прямое и обратное линейные преобразования по латеральным координатам и несущественны для дальнейших рассуждений.

Таким образом, поле определяется двумя независимыми функциями, V и X – решениями двух разных краевых нестационарных задач. Вклад каждого решения определяется конфигурацией источника (стороннего тока) посредством значений функций $\text{div } j^{\text{ct}}(x,y)$ и $\text{rot}_z j^{\text{ct}}(x,y)$. Понятно, что одна составляющая определяется током, стекающим с заземлений (возбуждается гальваническим путем), а другая составляющая зависит от вихревой компоненты в распределении стороннего тока (возбуждается индуктивным путем). Речь идет о том, что в силу одномерности модели среды, имеет место разделение общего поля на Е- и Н-составляющие (поперечно-магнитное и поперечно-электрическое поля, ТМ (transverse magnetic) и ТЕ (transverse electric), поле электрического типа и поле магнитного типа, Е- и Н-моды). Итак, физико-математические основы индукционной электроразведки с контролируемыми источниками двудеины и симметричны по отношению к полям электрического и магнитного типов.

«ТЕ-ТМ-анализ» был бы необходим и при отсутствии возможности возбуждения чистого ТМ-поля. Известно, что горизонтальная электрическая линия сложный источник, состоящий из трех: протяженного индуктивного

(провод с током) и двух гальванических (заземления по концам провода). Уже электродинамическая картина довольно сложная. Но ведь этот источник (ГЭЛ) используется для изучения процессов ВП. При этом возникает вовсе причудливая смесь сложного электродинамического поля и разнородных процессов ВП (первичного и вторичного, гальванического и индукционного). А если это происходит в условиях латеральной неоднородности?

Однако ТМ-поле реально не только в качестве компоненты поля любого сложного заземляемого источника, но оно (также, как и ТЕ-поле для петли) является полным полем вполне реальных источников. Один такой источник давно знаком электроразведчикам – это вертикальный диполь (ВЭД) или вертикальная линия (ВЭЛ).

Наземный источник ТМ-поля можно предложить, исходя из формулы (1.1). Мы должны потребовать, чтобы (в полярной системе координат)

$$\text{rot}_z \mathbf{j}^{cm} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial(rj_\varphi^{cm})}{\partial r} - \frac{\partial j_r^{cm}}{\partial \varphi} \right] = 0. \quad (1.2)$$

Очевидное решение – это осесимметричное распределение стороннего тока, имеющего только радиальную компоненту $j_r^{cm}(r)$. Эта конфигурация стороннего тока позволяет говорить о радиальном способе возбуждения. Будем называть такой источник круговой электрический диполь (КЭД) [26]. Такой источник можно реализовать радиально расположенными электрическими линиями. КЭД – единственное реальное средство возбуждения только Е-поляризованного поля с земной поверхности.

Свойства переменного (особенно, устанавливающегося) ТМ-поля в прикладном электроразведочном аспекте мало исследованы. Поздние стадии, эквивалентность, роль токов смещения, роль формы токового импульса – эти и другие устоявшиеся понятия нестационарной и квазистационарной геоэлектрики с контролируемыми источниками должны быть пересмотрены на случай, когда полное поле является полем чисто электрического типа. Но наиболее впечатляющим является отсутствие квазистационарного

магнитного отклика горизонтально-слоистого разреза. Такая конфигурация магнитного поля вполне объяснима, если рассмотреть систему токовых линий, образуемую вторичным полем. ТМ-поле ортогонально ТЕ-полю. Если поле токовой петли имеет компоненты H_r , H_z , E_φ , то поле КЭД (или ВЭД) имеет H_φ , E_r , E_z . Токи текут и замыкаются в вертикальных плоскостях и образуют тороидальную систему. Правильная тороидальная система токов не имеет квазистационарного магнитного поля вне себя.

Итак, это именно то, что мы хотели бы иметь для создания площадной электроразведки с закрепленным источником, имеющей задачей прослеживание слабых неоднородностей. В отсутствии нормального магнитного отклика от вмещающей среды мы можем фиксировать слабые сигналы, связанные с латеральными неоднородностями. Метод электроразведки с использованием переменного ТМ-поляризованного поля называется зондированиями вертикальными токами (ЗВТ), поскольку наличие вертикальной компоненты электрического поля важнейший физический аспект применения ТМ-поля в геоэлектромагнитных исследованиях.

Теоретические и методические основы нового способа электроразведки с использованием КЭД в качестве источника изложены, например, в работе [33]. Общая схема работ методом ЗВТ–М (т.е. зондирования вертикальными токами с регистрацией dB_z/dt) приведена на рис. 1.3. Устанавливается питающая установка – круговой электрический диполь с радиусом, соответствующим глубине исследований. В упоминаемых ниже полевых работах радиус КЭД составлял 250-750 м. Идея такого источника подразумевает, что геометрия его правильная, а токи в лучах выровнены.

Особую проблему составляет необходимость поддерживать назначенные и равные токи (5-10 А) в лучах, причем, в импульсном режиме. Специальная электронная система следит за этим, и эта система и есть специфическая аппаратура ЗВТ, которая была разработана в СНИИГГиМС Балашовым Б.П. [1, 2, 3, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48].

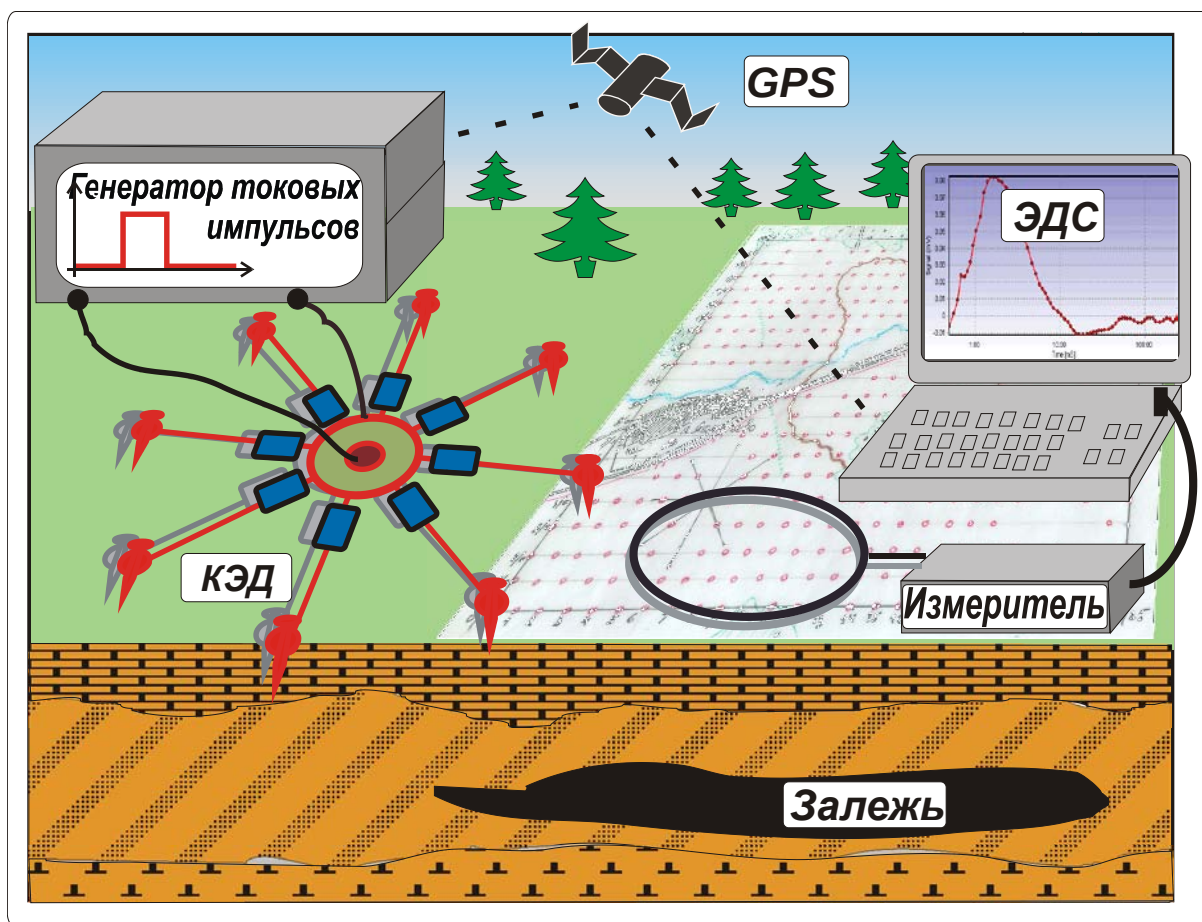


Рис.1.3. Схема работ методом ЗВТ-М

Измерительный комплекс состоит из компактного индукционного датчика и измерителя переходного сигнала – стандартных элементов аппаратуры МПП или ЗСБ. Комплекс (один или несколько) свободно перемещается по площади с использованием спутниковой пространственно-временной привязки к источнику. Удаление от источника до 5 радиусов источника. Таким образом, при закрепленном источнике радиусом 750 м может быть оперативно исследована площадь до 50 км².

Совокупность измеренных сигналов становления с каждого пункта наблюдения, нормированные на расстояние и параметры генераторно-измерительного комплекса, расположенных в соответствии со своим положением на местности и представленные на определенном времени есть площадной сигнал ЗВТ. Площадной сигнал ЗВТ, представленный на оптимальном фиксированном времени, свободный от фона вмещающей среды и целиком обязанный латеральным неоднородностям, с которыми связан пространственно, обладает высокой визуализирующей способностью, то есть на площадных сигналах четко выделяются контуры аномальных областей, которые и являются конечным результатом геофизических работ. Оптимальное же время отображения площадных сигналов, в каждом конкретном случае определяется отдельно, но чаще всего это времена, на которых сигналы становления имеют либо максимум значений, либо максимум градиента.

Идеология метода ЗВТ довольно нова. Следует подчеркнуть, что метод вовсе не «отменяет» традиционные методы ЗС. ЗВТ призваны решать специфические задачи в современных условиях и, как правило, должны использоваться в комплексе с обычными методами. Здесь мы особо рассмотрим некоторые вопросы, возникающие при ознакомлении с этим новым способом электроразведки.

1.2 Методические особенности ЗВТ

1.2.1 ЗВТ и метод чистой аномалии

Иногда метод ЗВТ относят к разряду так называемых методов чистой аномалии. У методов чистой аномалии плохая репутация в геоэлектрике и вполне заслуженно. О ЗВТ-М часто говорится, что в нем измеряется поле аномальных объектов. Это верно, но при этом фиксируется полное поле, которое существует на дневной поверхности.

Можно определить метод чистой аномалии как метод, в котором определенным образом регистрируется только некоторая (аномальная) часть полного поля, а полное поле является помехой. Однако полное поле, так или иначе «пролезает» в наблюдаемый сигнал и в этом слабость метода чистой аномалии. Например, в приведенном выше примере многоразносных наблюдений мы могли бы пытаться фиксировать азимутальную компоненту магнитного поля, чисто аномальную, и таким образом как будто решить проблему изменчивого фонового сигнала. Но искушенный электроразведчик вряд ли соблазнится подобным предложением.

В ЗВТ мы устраиваем источник таким образом, что полное поле во всех магнитных компонентах не содержит отклика от вмещающей толщи. В этом случае проблема влияния нормальной части разреза решается на физическом уровне, а не за счет ограниченной пространственно-временной выборки и фиксации отклика. Разумеется, теперь есть проблемы в точном устройстве источника, но это уже другой вопрос. Надо заметить, что за претензию на детальный трехмерный результат надо платить новыми и более мощными средствами обработки и интерпретации с одной стороны, но также и более совершенным и сложным устройством самого эксперимента. Приведем еще интересный умозрительный эксперимент, в котором действительный метод чистой аномалии трансформируется в ЗВТ. Итак, мы желаем измерять только отклик от неоднородности в разрезе. Возьмем для

этого в качестве источника линию АВ и будем измерять магнитное поле на оси. Это, безусловно, метод чистой аномалии. Констатируем, что вертикальная компонента нормального магнитного поля равна нулю на оси линии. Эта ось является линией резкого перехода через 0, что создает критические условия для измерений. Кроме того, таких измерений мало по площади. Присоединим вторую питающую линию, включив ее навстречу первой (рис.1.4) так, что нормальное магнитное поле будет равно 0 уже на четырех направлениях от центрального электрода. Крестообразное расположение четырех линий даст восемь направлений с нулевым магнитным полем и т.д. Заметим, кстати, что, устраивая вместо линии такую конфигурацию, мы только перераспределяем ток и, значит, способны сохранять ту же массу проводов и заземлений.

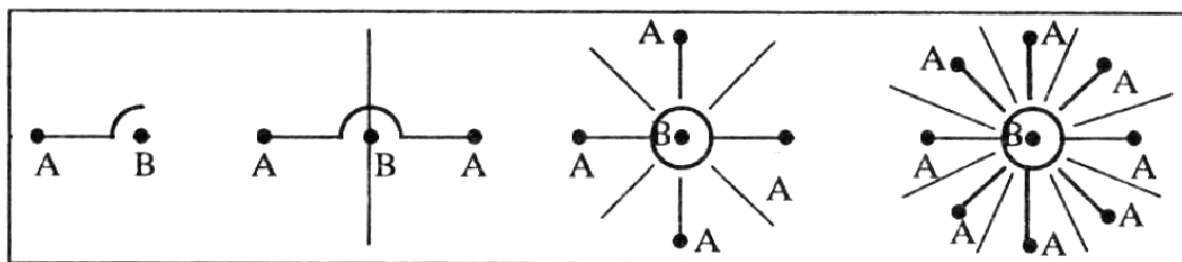


Рис. 1.4. Лучи нулевого поля для различных конфигураций источника

Практически можно ограничиться восемью питающими лучами, что обеспечивает нулевой нормальный фон по 16 направлениям. Но важно также, что хотя эти радиальные профили по-прежнему есть линии перехода через 0, но значения остаточного магнитного поля между ними становятся пренебрежимо малы, и можно устраивать уже площадные измерения полного поля, генерируемого неоднородностями разреза. Мы ушли от метода чистой аномалии и опять-таки получили питающую установку КЭД.

1.2.2 Сигналы ЗВТ и горизонтально-слоистый разрез

Рассмотрим вопрос о роли горизонтально-слоистого разреза в ЗВТ. ТМ-поляризация реализуется в чистом виде только в горизонтально-слоистой среде. Но в некотором смысле и становясь на крайнюю точку зрения, можно

сказать, что горизонтально-слоистого разреза не существует в природе, всегда есть какие-то отклонения. Однако, с другой точки зрения можно сказать, что, напротив, идеальный (воображаемый, кажущийся, эффективный) горизонтально-слоистый разрез существует всегда, вбирая в себя основную массу проводимости разреза. Эта вмещающая среда (ее отклик) не присутствует в сигнале. Фиксируемый сигнал отражает различного рода отклонения от этой идеальной горизонтально-слоистой модели и подлежит разбраковке и трехмерной интерпретации.

Строго говоря, следует уточнить, что применение КЭД в качестве источника позволяет убрать отклик не горизонтально-слоистого разреза, а некоторого осесимметричного распределения проводимости (имеется ввиду ось КЭД).

Таким образом, измеряемый сигнал от горизонтально-слоистого разреза, а в общем случае от любого осесимметричного разреза, ось которого совпадает с осью источника, будет равен нулю на всех временах становления.

Тот сигнал, который измеряется в ЗВТ, если он не равен нулю, есть отражение нарушения горизонтально-слоистости, и в этом сигнале должна быть отражена область, которая не является горизонтально-слоистой.

Исходя из моделирования простой границы в горизонтально-слоистой среде, можно увидеть, что граница совпадает с переходом через ноль в профильном сигнале. Таким образом, можно определить критерий выделения границ аномальных областей, как область перехода через ноль в площадном или в профильном сигнале ЗВТ.

Оптимальным же временем становления, для выделения подобных границ будет то время, на котором общий средний сигнал по профилю или по площади будет максимален, и на фоне этого максимального сигнала граница аномальной области будет выделяться наиболее четко.

1.2.3 Ранние времена ЗВТ

В традиционных (индуктивных) ЗС хорошо реализуется принцип зондирования. С течением времени становления мы получаем информацию о все более глубоких частях разреза. В структурной электроразведке речь идет о первых секундах. Обращает на себя внимание тот факт, что в ЗВТ при решении аналогичных задач мы используем сигнал на самых ранних временах (5-50мс). Это может быть истолковано, как проявление приповерхностных неоднородностей и, таким образом, речь идет о несостоятельности метода. Однако этот вопрос очень простой. Мы имеем сугубо гальванический источник и в его поле (магнитном) есть информация о глубоких неоднородностях не только на ранних временах, но даже и в режиме прямого тока до выключения. Поскольку мы измеряем индукционными датчиками, то время максимального проявления неоднородности несколько сдвигается, но все же остается ранним.

1.3 Специфика обработки площадных данных ЗВТ-М

Площадной магнитный отклик в ЗВТ-М, свободный от фона вмещающей среды и целиком обязанный латеральным неоднородностям, с которыми связан пространственно, обладает высокой визуализирующей способностью. Разумеется, углубленная и полная интерпретация должна производиться с помощью трехмерного моделирования. Однако с трехмерным моделированием в ЗВТ-М имеются очень серьезные проблемы. Основная проблема состоит в том, что пока плохо понята природа трехмерного сигнала ЗВТ-М.

Таким образом, основным приемом обработки, визуализации и интерпретации в ЗВТ-М пока является построение (после первичной обработки) профильных кривых или карт рельефа наблюденного поля по площади на различных фиксированных временах. Рельеф сигнала по площади своими экстремумами прямо указывает на неоднородность. В некоторых случаях это дает результат, оцениваемый как достаточный.

Надо заметить, что плотный площадной сбор данных в условиях структурной электроразведки – фактор необычный. При этом возникает новое качество (например, замечательная устойчивость к искажениям сигнала на отдельных точках наблюдения), а также возникает ряд задач по далеко не технической процедуре обработке площадного сигнала. Далее мы отметим некоторые из таких задач, решение которых являются результатами, приведенными в Главе 2 диссертации.

1.3.1 3D-сигнал ЗВТ. Двуполярность сигнала ЗВТ-М

Как показывает опыт предыдущих полевых работ [39, 41] методом ЗВТ-М над нефтяными залежами, мы имеем однополярный сигнал. Почему полевой сигнал ЗВТ имеет однополярную аномалию над залежью? Действительно, и математическое и физическое моделирование для простых включений во вмещающую среду дает всегда двуполярный сигнал над

неоднородностью. Это, собственно, связано с сохранением общего тока в среде, так что сгущение тока (в проводящей неоднородности) обязательно сопровождается разрежением, а картина наблюдаемого сигнала этому соответствует. Теперь мы должны заявить, что геоэлектрическая модель углеводородной залежи не имеет никакого отношения к этому простому моделированию (однородное включение). Даже в рамках одного геоэлектрического параметра (проводимости) залежь много сложнее (трехмерная структура с обширными изменениями над залежью, анизотропия, распределение минерализованной воды), чем те модели, которые мы или другие исследователи использовали. Сложность модели приводит к тому, что на деле она никогда не известна с необходимой точностью. Составление геоэлектрической модели залежи (вместе с эпигенетическими изменениями окрестности) – это отдельная непростая задача, которая к тому же, вероятно, весьма индивидуальна для каждой конкретной залежи.

Другой важный момент состоит в том, что поскольку в ЗВТ используется заземляемый и полностью неиндуктивный источник, отклик (даже магнитный) имеет, возможно, не электродинамическое происхождение.

Отметим также, что в определении знака площадного сигнала ЗВТ при площадной визуализации с использованием нескольких постановок КЭД, есть степень свободы, поскольку нам при построении площадных сигналов не важен знак аномальной области, а важен ее контур и интенсивность по сравнению с соседними участками. Эта степень свободы использовалась при визуализации площадного сигнала в работах методом ЗВТ-М на Шуганской [41] и Красно-Октябрьской залежах [39] в Татарстане для того, чтобы получить в результирующем площадном сигнале однополярную аномальную область, контуры которой получены от измерения сигналов от нескольких источников.

На рисунке 1.5 для оконтуривания круглой простой «залежи» сделали три постановки КЭД. Соответственно, каждый раз имеем двуполярный сигнал. Но если мы теперь попытаемся изобразить площадной сигнал сразу от всех источников, мы должны будем разрешить противоречие с наличием в одной точке измерения сигналов разного знака от разных источников.

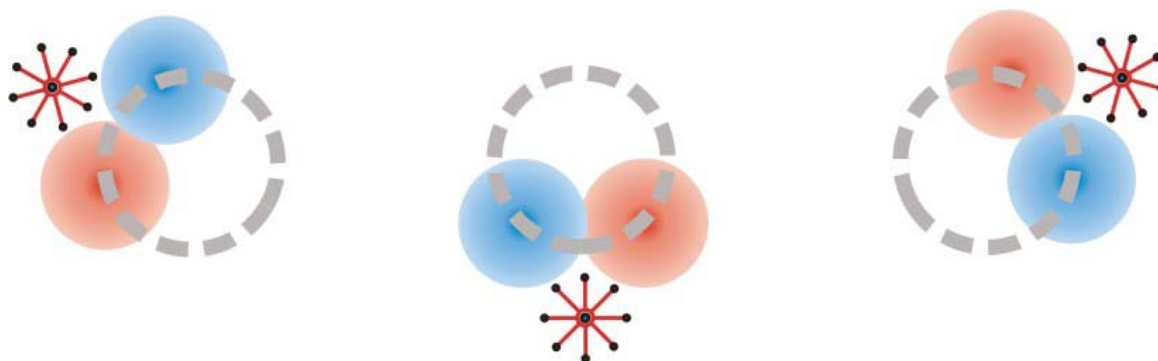


Рис.1.5. Распределение сигнала от объекта для различного местоположения установки КЭД

1.3.2 3D-сигнал ЗВТ. Нормировка временных и профильных срезов

Площадной сигнал от закрепленного источника имеет естественную тенденцию к ослаблению с увеличением расстояния от источника. При визуализации сигнал подлежит нормированию. Если речь идет о нормальном сигнале (отклик от одномерной среды), то закономерности спада сигнала могут быть изучены и определены в зависимости от типа источника и измеряемой компоненты поля. Однако, если, как это имеет место в ЗВТ-М, сигнал – сугубо трехмерного происхождения, закономерности трудноопределимы. Следовательно, необходимо найти алгоритмы таких нормировок. Притом, применить независимо к каждому временному срезу. Все это осложняется еще и тем, что на одной площади работ может быть несколько постановок КЭД, которые в свою очередь нужно увязать между собой с учетом нормировки каждого временного среза для каждого КЭД.

Те же вопросы возникают при построении профильных сигналов. С увеличением времени сигнал уменьшается по амплитуде и для построения равномерного среза по профилю также необходима нормировка, опять же с учетом нескольких постановок КЭД.

Эти замечания и рассуждения не есть полное объяснение вида полевого площадного сигнала ЗВТ над латеральной неоднородностью, но из этого следует, что разработчики имеют в виду эту проблему. Проблема состоит в том, что имеется благоприятный экспериментальный факт, не моделируемый пока математически. В геоэлектрическом эксперименте, в котором убрано не только прямое поле источника, но и прямой отклик вмещающей среды, мы вправе ожидать более тонкие и сложные сигналы от среды, нежели в методах, фиксирующих суммарные сигналы.

С учетом всех этих обстоятельств необходимо было разработать алгоритмы построения временных срезов с использованием данных от нескольких источников (установок КЭД). Кроме того, весьма полезны для представления полевого материала и дальнейшей интерпретации профильные сигналы. В частности, возникает задача о соотношении времен наблюдения и глубин для трехмерного сигнала.

1.4 1D-сигнал ЗВТ. Становление электрического поля

Можно считать, что КЭД есть наземный аналог ВЭД. Именно в таком качестве он и был предложен в 1982 г. и подробно обоснован позже [43, 26].

В методе ЗВТ-М регистрируется аномальный магнитный отклик неоднородной среды. Нормальное поле электрического типа (от КЭД или ВЭД) имеет на дневной поверхности только радиальную электрическую компоненту. Как уже говорилось выше, эта компонента быстро затухает в процессе становления, но мы имели в виду только электродинамический процесс. В реальных средах электрическое поле будет определяться также процессами вызванной поляризации (ВП).

На практике использование данных об электрическом сигнале даст информацию о вмещающей среде, причем учитывая именно специфику установки КЭД и системы токов, которую возбуждает КЭД в среде. Также интересно определить насколько влияют на сигнал радиальной электрической компоненты процессы вызванной поляризации. Исходя из скоростей электродинамических процессов и процессов ВП такое влияние, на поздних временах, может быть очень значительно. Соответственно появится возможность измерять величины параметров ВП, ну или хотя бы строить площадное отображение изменений этих параметров (профилирование), что будет являться новой дополнительной информацией. Подходу к решению этих вопросов посвящена Глава 3.

Глава 2 АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ПЛОЩАДНЫХ ДАННЫХ МЕТОДА ЗВТ-М И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

2.1 *Этапы обработки данных метода ЗВТ-М*

Для обработки полевых данных метода ЗВТ-М существовало программно-алгоритмическое обеспечение, предназначенное для работы в среде Windows. Эта система, получившая название «ЗаВеТ-М» по аббревиатуре названия метода, предоставляла возможность выполнять интерпретацию данных измеренных методом ЗВТ.

Но возможностей, которые предоставляла система «ЗаВеТ-М», было недостаточно для полноценной и оперативной обработки полевых материалов. Для устранения этих существенных недостатков системы были добавлены новые функции, доработан ряд процедур и созданы дополнительные программы.

Процесс получения конечного результата работ из полевых данных ЗВТ-М можно разбить на три этапа:

Первый этап – предварительная обработка полевого материала. Целью предварительной обработки является отбраковка некачественных файлов полевых измерений, фильтрация помех, если это требуется, выявление пикетов, данные от которых нужно исключить из обработки в силу объективных причин.

Второй этап – построение площадных сигналов ЗВТ-М на интересующих временах и построение профильных сигналов ЗВТ-М с учетом всех параметров генераторно-измерительного комплекса и геоэлектрических свойств среды.

Третий этап – построение, на основе изученной априорной геологической и геофизической информации, геоэлектрической модели

среды и аномальных объектов в ней, расчет прямой задачи от построенной модели, сопоставление полевых и расчетных данных.

Каждый из этих этапов был доработан в процессе исследований, были созданы новые алгоритмы, позволяющие получать более качественные результаты, и также созданы новые дополнительные инструменты в программном комплексе, которые позволили ускорить процесс обработки данных.

2.1.1 Разработка специализированных алгоритмов обработки данных применительно к ЗВТ-М (автоматическая нормировка данных, совмещение данных от нескольких КЭД, автоматическое построение профильных разрезов)

Создание новых алгоритмов для обработки данных коснулось в основном второго этапа обработки. Это создание следующих алгоритмов: автоматическая нормировка данных при построении площадных сигналов, которая необходима и которая учитывает параметры измерительно-генераторного комплекса; совмещение данных от нескольких генераторных установок КЭД; построение профильных сигналов ЗВТ.

Выбор времени для построения площадных сигналов производится с учетом двух факторов. Первый – это типичный вид измеренного сигнала. При просмотре измеренных кривых ЭДС можно определить типичный вид сигнала, а именно количество и положение локальных максимумов и минимумов, а также переходов через ноль в нем. Второй фактор, который следует учитывать, это то, что каждое время измерения соответствует определенной глубине. К примеру, нас интересует площадной сигнал ЗВТ-М, соответствующий глубине 1000 м. Тогда нужно рассматривать то время измерения, которое соответствует этой глубине или времена близкие к этому.

После выбора времени, на котором нас интересует площадной сигнал ЗВТ-М, следует провести нормировку. Нормировка учитывает различное

удаление пикетов от питающей установки. Понятно, что чем дальше пикет находится от установки, тем меньшая амплитуда будет у измеряемого сигнала. Соответственно, если этот фактор не будет учтен, то при построении площадного сигнала, получим равномерное понижение уровня измеряемой ЭДС при удалении точки наблюдения от установки. Ранее нормировка осуществлялась «на глаз», что не позволяло точно определять нормировочный коэффициент.

Считая, что система токов возбуждаемых в среде установкой КЭД можно представить набором диполей, можно сказать, что падение сигнала от расстояния будет иметь степенную зависимость. Степень будет меняться в зависимости от сложности системы токов, и которая также может меняться с течением времени зондирования. Исходя из этого, был выбран способ нормировки сигнала от расстояния.

В качестве величины, которая отображается в площадном сигнале ЗВТ-М на какой-либо точке измерения, выступает $E_i^{нор}$ равное $E_i^{нор} = E_i \cdot r_i^x$, где E_i – ЭДС измеренная на i -ом пикете, r_i – расстояние от i -ого пикета до центра КЭД, x – степень зависимости сигнала от расстояния, или что то же самое, нормировочный коэффициент.

Критерием правильно подобранного нормировочного коэффициента, является отсутствие явной зависимости величины $E_i^{нор}$ от расстояния до источника, при этом распределение $E_i^{нор}$ по всей площади должно быть максимально равномерным.

Математически это условие выражается так:

$$\sum_{i=1}^n \left[E_i \cdot r_i^x - \frac{\sum_{j=1}^n E_j \cdot r_j^x}{n} \right]^2 \Rightarrow \min ,$$

где E_i – полевое значение сигнала в i -ой точке наблюдения, r_i – расстояние от центра КЭД до i -ой точки наблюдения, n – количество точек наблюдения, на которых проводились измерения при данной постановке КЭД.

Именно автоматический поиск степени зависимости сигнала от расстояния и есть алгоритмическое нововведение в процесс нормировки. При построении площадного сигнала ЗВТ-М на другом времени измерения, коэффициент может меняться.

Первоначально полевые исследования проводились на небольших площадях, и было вполне достаточно одной постановки КЭД для получения результата, но работы в Татарстане по оконтуриванию нефтяных залежей показали, что одной генераторной установки недостаточно для решения поставленных задач. Сразу возник вопрос о том, как увязывать данные от нескольких постановок КЭД

Если работы проводятся с несколькими постановками КЭД, то требуется провести сшивку данных от всех КЭД. Поскольку от различных КЭД на одном и том же пикете можно получить разные уровни сигнала, то и при построении площадных сигналов от разных КЭД получится разный средний уровень интенсивности, что требует дополнительной нормировки.

Был предложен следующий способ совмещения данных, полученных от разных КЭД, который проводится в два этапа.

Определяется приоритетность данных КЭД. То есть, исходя из качества полевого материала и насыщенности точек наблюдения определяется, данные от какого КЭД наиболее предпочтительны, а от какого менее предпочтительны. Потом к наиболее предпочтительным данным дополняются менее качественные, и так далее для данных от всех КЭД. Естественно, что при стыковке может меняться средний уровень сигнала для разных КЭД, поэтому при стыковке нужно провести процедуру нормировки, которая описана ниже.

Для участка каждого КЭД определяется средний уровень амплитуд сигналов и коэффициент приведения к уровню, полученному от КЭД-1 (первого КЭД) по формуле:

$$K_i^{nor} = \frac{\tilde{E}_1^{nor}}{\tilde{E}_i^{nor}},$$

где K_i^{nor} - коэффициент приведения для сигналов от КЭД- i ; $\tilde{E}_1^{nor}$ - средний уровень сигналов, полученных от КЭД-1; $\tilde{E}_i^{nor}$ - средний уровень сигналов, полученных от КЭД- i .

Далее, умножая на полученные коэффициенты, сигналы по всей площади исследования для каждого времени измерения, приводятся к одному общему уровню – уровню основного участка с $K_1^{nor} = 1$.

Понятно, что можно выбрать другой алгоритм увязки данных от различных питающих установок, но на данный момент реализован этот. Такой способ увязки показал свою эффективность при обработке данных. В дальнейшем планируется включить в программу «ЗаВеТ-М» и другие способы увязки, и в процессе работ выбирать наиболее оптимальный из них.

Вспоминая параграф 1.3.1, в котором говорилось об изменении сигнала от КЭД при изменении его местоположения относительно неоднородности, необходимо также внести еще дополнительную возможность изменять знак всего площадного сигнала для корректной сшивки данных от нескольких КЭД.

Кроме построения площадных сигналов ЗВТ-М возникла необходимость строить также и профильные сигналы. Это нормированный сигнал ЗВТ вдоль какого-либо профиля, который отображает изменение сигнала ЗВТ по глубине вдоль профиля, и соответственно может говорить о глубинных изменениях в среде. Нормировка профильного сигнала должна включать в себя параметры генераторно-измерительного комплекса,

параметры среды, учет нескольких постановок КЭД и понижение уровня сигнала с течением времени.

При построении профильных сигналов ЗВТ каждому времени ставится в соответствие некая эффективная глубина, то есть на каждой точке измерения имеем кривые, привязанные по глубине. Выбрав несколько таких кривых вдоль профиля, получаем профильный сигнал ЗВТ-М, связанный с глубиной. Профильные сигналы содержат в себе информацию о глубинном строении среды вдоль определенного профиля, точнее об отличии электрических свойств неоднородностей по сравнению с вмещающей средой.

Для построения профильного сигнала ЗВТ-М нужно определить коэффициент, отвечающий за привязку по глубине, среднее сопротивление геоэлектрической среды и выбрать временной нормировочный коэффициент.

Привязка по глубине осуществляется с использованием следующей формулы:

$$H_i = k \cdot \sqrt{\frac{t_i \cdot \rho}{\mu_0}},$$

где H_i – глубина, соответствующая i -ому времени измерения, t_i – i -ое время измерения, ρ – среднее сопротивление разреза, которое равно $\rho = \frac{\sum h_i \cdot \rho_i}{\sum h_i}$, где

h_i – это мощность i -го слоя, а ρ_i – сопротивление i – го слоя в одномерной модели среды, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, k – временной нормировочный коэффициент.

Зависимость от параметров t и ρ определялась из соображений размерности. Точная привязка по глубине обеспечивается коэффициентом k , с использованием априорной геологической информации.

При измерении переходного процесса интенсивность сигнала на ранних временах на несколько порядков больше, чем на поздних. Соответственно, при «прямом» отображении профильного сигнала ЗВТ, получим очень быстрый равномерный спад интенсивности при увеличении

времени, на фоне которого не будет видно изменений в сигнале от точки к точке. Временной нормировочный коэффициент обеспечивает равномерность сигнала при увеличении времени.

Будем считать, что интенсивность измеряемой ЭДС падает с увеличением времени по степенному закону. Поэтому для получения примерно равного уровня сигнала по всем глубинам на профильном сигнале следует отображать не ЭДС, а $ЭДС * t^x$, где x – искомый, временной нормировочный коэффициент. Этот коэффициент должен обеспечить отсутствие зависимости интенсивности сигнала на профильном сигнале от глубины. Как показала наша практика, обычно он лежит в промежутке от 0.2 до 0.8.

Несомненно, можно предложить и другие способы нормировки профильных сигналов ЗВТ-М, которые в дальнейшем будут реализованы, но на данном этапе на практике этот способ признан работоспособным и является основным для построения разрезов по сигналам ЗВТ-М.

Созданные и описанные здесь алгоритмы позволяют автоматически и без потерь времени, строить площадные и профильные сигналы ЗВТ, что ранее не делалось вовсе, либо на это требовалось много времени. Суть этих алгоритмов довольно проста и все они ранее применялись в разных методиках обработки данных, но после реализации данных алгоритмов в программном комплексе «ЗаВеТ-М», стала возможна экспресс-интерпретация в полевых условиях, при проведении экспериментальных работ и существенно возросла скорость обработки материала.

2.1.2 Реализация алгоритмов обработки в программном комплексе «ЗаВеТ»

Усовершенствования программного комплекса «ЗаВеТ» коснулись всех трех этапов обработки и интерпретации полевых данных ЗВТ.

Первый этап – предварительная обработка, первоначально проводилась в других программных продуктах, например, в измерительной программе для аппаратуры «Цикл-5». Это значительно влияло на скорость работы с материалами и качество конечного результата.

В программном комплексе были реализованы следующие процедуры предварительной обработки, которых не было ранее: предварительный просмотр всех отдельных измерений (дублей), сделанных на отдельной точке измерения; осреднение всех или некоторых измерений (дублей) с одной точки измерения; сглаживание измеренной кривой; интегрирование измеренной кривой.

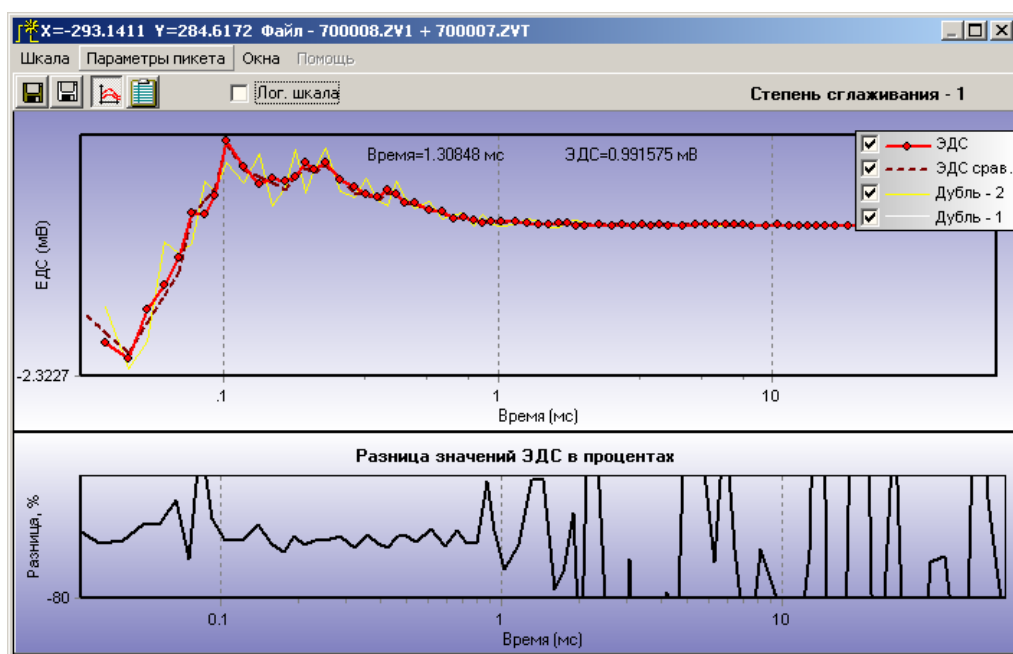


Рис. 2.1 Окно предварительного просмотра измеренных сигналов.

Созданный предварительный просмотр (рис. 2.1) позволяет отображать кривые ЗВТ-М, причем сразу несколько. Соответственно, если мы выведем на график данные всех измерений на определенной точке, то из них можно выбрать наилучший, который и будет использоваться для последующей интерпретации. Также с помощью процедуры просмотра можно сравнивать измеренные кривые на соседних точках, сравнивать остаточное или теоретическое поле на разных пикетах, определять качество полевого какой-

либо полевой кривой, его зашумленность по сравнению с другими кривыми. Основной целью использования этой программы является выбор наилучшего дубля для каждого пикета, определение качества измеренных кривых и отбраковка некачественного материала.

Отбраковку полевых кривых приходится осуществлять в связи с наличием помех в измеряемых кривых. Эти помехи могут создаваться от металлических трубопроводов, ЛЭП, населенных пунктов и других источников электрических помех. Кроме того, некачественные полевые данные могут быть из-за сбоев в аппаратуре при проведении измерений. С использованием процедуры просмотра можно выявить зашумленные кривые и исключить их из обработки.

В процессе предварительной обработки появилась возможность сглаживать измеренные полевые кривые. Сглаживание кривой можно производить несколько раз до получения приемлемого результата, и также можно вернуть сглаженную кривую к первоначальному виду.

Процедура сглаживания, реализованная в программе «ЗаВеТ-М», работает по следующему алгоритму:

в качестве входных данных для процедуры сглаживания выступают массивы времен и измеренных ЭДС:

E_i – измеренная ЭДС на i -ом времени, T_i – значение i -ого времени, n – количество времен измерений, к этим массивам добавляются краевые элементы $E_0=2 \cdot E_1 - E_2$, $E_{n+1}=2 \cdot E_n - E_{n-1}$, $T_0=2 \cdot T_1 - T_2$, $T_{n+1}=2 \cdot T_n - T_{n-1}$.

Конечный массив времен не изменяется: T_i – где i меняется от 1 до n . Конечные значения в массиве ЭДС вычисляются по следующей формуле:

$$E_i^{cz} = \frac{E_{i-1} + E_i + E_{i+1}}{3} + \frac{\tilde{E}_i \cdot (2 \cdot T_i - T_{i-1} - T_{i+1})}{3},$$

$$\text{где } \tilde{E}_i = \frac{3 \cdot (T_{i-1} \cdot E_{i-1} + T_i \cdot E_i + T_{i+1} \cdot E_{i+1}) - (T_{i-1} + T_i + T_{i+1}) \cdot (E_{i-1} + E_i + E_{i+1})}{3 \cdot (T_{i-1}^2 + T_i^2 + T_{i+1}^2) - (T_{i-1} + T_i + T_{i+1})^2}.$$

Таким образом, после сглаживания получаем массив ЭДС той же размерности, что и вначале. Этот метод сглаживания описан в книге Ланцоша [22].

Очень часто встречается ситуация когда несколько измерений на одной точке достаточно сильно различаются по амплитуде, но имеют одну форму сигнала, тогда в качестве основной кривой, которая пойдет в дальнейшую обработку, необходимо взять среднее от всех или только нескольких измерений для данной точки.

Данная процедура тоже реализована в программном комплексе «ЗаВеТ». Осреднение осуществляется по следующей формуле:

$$E_i^{cp} = \sum_{j=1}^n \frac{E_i^j}{n},$$

где n – количество дублей, E_i^{cp} – осредненный сигнал на i -ом времени, E_i^j – сигнал на i -ом времени у j -го дубля.

Кроме того, для предварительной обработки также была реализована процедура интегрирования сигнала по следующей формуле:

$$E_i = \sum_{j=i+1}^n E_j \quad \text{где } E_i - \text{сигнал на } i\text{-ом времени, } n - \text{количество}$$

времен.

Данная трансформация сигнала может быть полезна в условиях повышенного уровня периодической помехи, когда на весь сигнал наложен шум с определенным периодом (например, 50 Гц). Подобная трансформация значительно понижает уровень шума, что способствует повышению качества конечного материала. Также эта трансформация имеет и физический смысл, если вспомнить, что мы измеряем $\frac{dB_z}{dt}$, то после такой трансформации, которая есть не что иное, как интеграл по времени от измеряемого сигнала, мы получим непосредственно магнитное поле.

Итак, в процессе предварительной обработки полевых измерений, с использованием описанных выше процедур, изучается каждая измеренная кривая ЭДС. Далее определяется ее качество, целесообразность включения этой кривой в обработку в зависимости от различных факторов, проводится сглаживание, суммирование или интегрирование кривых, если это требуется для улучшения качества материала. Результатом такой предварительной обработки являются кривые сигнала, готовые для использования при последующем построении площадных и профильных сигналов ЗВТ-М в программе «ЗаВеТ-М».

Для усовершенствования второго этапа обработки данных в программном комплексе были реализованы численные алгоритмы, которые описаны в параграфе 2.1.1. Это позволило в автоматическом режиме строить площадные сигналы на любых временах, и профильные сигналы вдоль любого выбранного профиля. Все это способствует оперативному анализу экспериментальных данных непосредственно в ходе проведения полевых работ. Это позволяет при необходимости корректировать дальнейшие действия, а значит сэкономить время, материальные затраты и повышает качество конечного результата работ.

Система «ЗаВеТ-М» содержит в себе математическую процедуру, осуществляющую расчет прямой задачи для заданной 3D-неоднородности в горизонтально-слоистой среде. Эта расчетная процедура основана на учете вторичных токов, возникающих в латеральных неоднородностях, и использует борновское приближение [25]. Использование этой процедуры позволяет рассчитать, измеряемый сигнал от сложных неоднородностей. Сопоставление расчетного и измеренного сигналов есть суть третьего этапа обработки и интерпретации полевых материалов.

Для его усовершенствования внутри программного комплекса «ЗаВеТ-М» был разработан графический интерфейс, который позволяет быстро создавать модели любой сложности. Это дает визуальное представление

В качестве базовой модели среды берется горизонтально-слоистая модель и в нее вносится неоднородность. Для задания неоднородности в среду вводится цилиндрическая система координат с началом в центре КЭД. В этой системе координат задается сетка, которая разбивает среду на небольшие сектора (рис. 2.2). Набор таких секторов с отличным от вмещающей толщи электрическим сопротивлением и есть модель неоднородности, от которой считается прямая задача. На рисунке 2.3 приведено окно *3D-моделирования* программы «ЗаВеТ-М», в котором реализован интерфейс оперативного создания, редактирования и визуализации модели неоднородности.

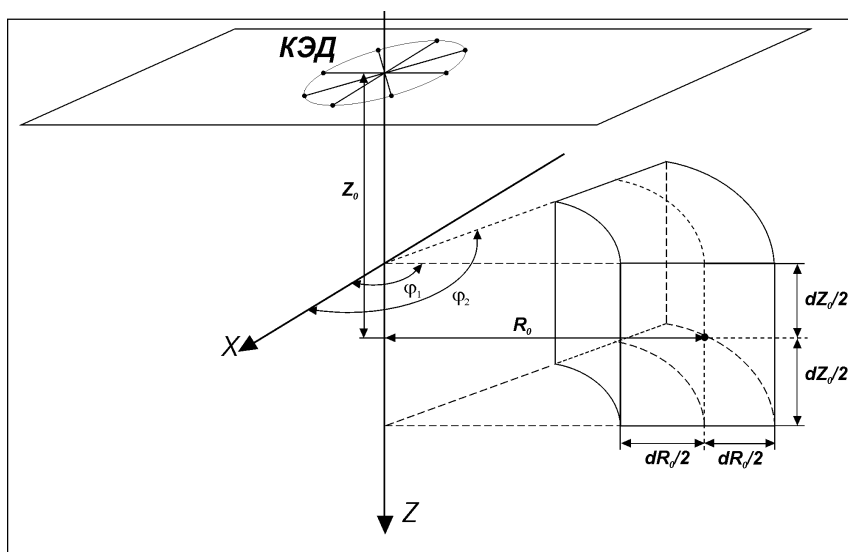


Рис. 2.2 Схема разбиения среды на небольшие сектора.

Интерфейс позволяет оперативно менять сетку разбиения среды на сектора, изменять сопротивления одного или нескольких секторов, удалять сектора неоднородности, просматривать построенную модель по разным угловым срезам и т.д.

В каждом угловом срезе задается набор секторов с сопротивлениями, отличными от вмещающей толщи. Количество секторов неоднородности

может достигать 3000, причем время, затрачиваемое на составление такой модели, составляет несколько минут.

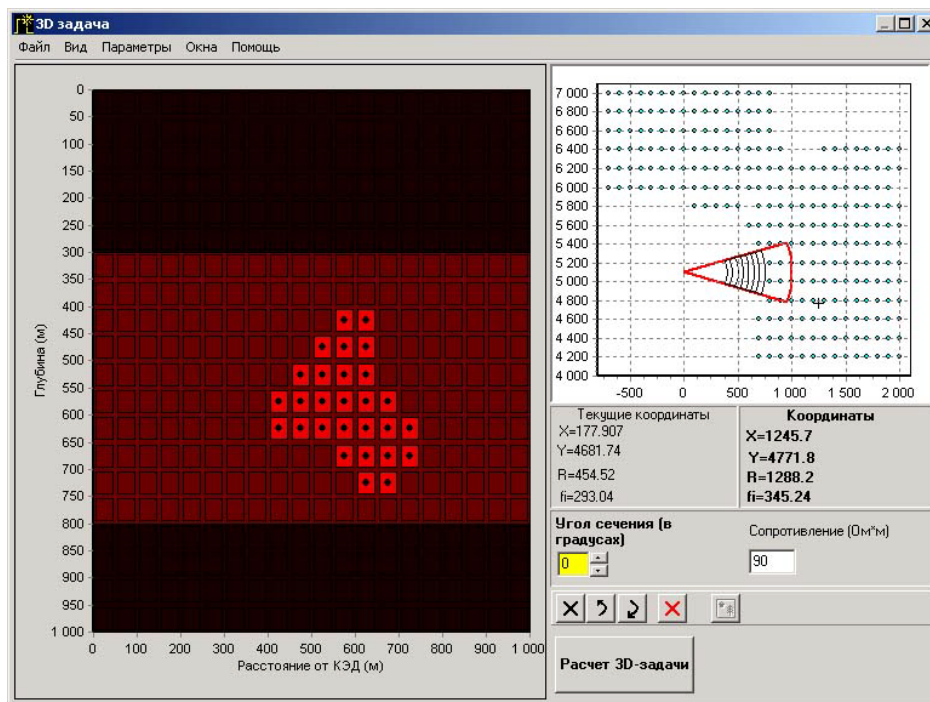


Рис. 2.3 Интерфейс для 3D-моделирования программы «ЗаВеТ».

С использованием такого интерфейса создания 3D моделей можно строить очень сложные структуры, максимально близко описывающие геоэлектрические особенности среды, а временные затраты при этом будут минимальны.

После расчета прямой задачи от построенной модели можно сравнить как кривые полевого и теоретического сигнала по отдельному пикету, так и сравнить площадные синтетические сигналы на каком-либо времени с измеренными данными.

Определение модели среды, рассчитанное поле от которой, будет хорошо совпадать с измеренным полем, есть конечная цель процесса интерпретации. Такая модель будет содержать в себе максимум априорной информации об участке работ, которая будет согласована с данными, полученными методом ЗВТ-М. Это трудновыполнимая задача, но используя созданный в программе «ЗаВеТ-М» интерфейс 3D-моделирования, можно

оперативно строить различные модели, усложнять их и добиваться наилучшего совпадения.

2.1.3 Выводы

Результатом проведенной работы являются новые алгоритмы и возможности программно-алгоритмической системы обработки данных для метода ЗВТ-М. Эта система обладает следующими не доступными до этого функциями, необходимыми для обработки и интерпретации экспериментальных данных: предварительная обработка полевого материала, автоматическая нормировка площадных сигналов, увязка данных от нескольких постановок КЭД, построение профильных сигналов, оперативное построение сложных 3D-моделей неоднородностей в среде и т.д.

Усовершенствование программно–алгоритмической системы «ЗаВеТ-М» значительно ускорило процесс обработки и интерпретации данных, что дает возможность получать предварительные итоги полевых работ непосредственно в процессе их проведения, и значительно упрощает получение окончательных результатов и улучшает их качество.

2.2 Примеры обработки экспериментальных данных полученных методом ЗВТ-М с использованием созданного программного обеспечения

В данном разделе представлены некоторые примеры полевых работ, которые отображают работоспособность и эффективность программно-алгоритмического комплекса «ЗаВеТ-М», и способов и алгоритмов обработки данных реализованных в нем.

2.2.1 Экспериментальные работы по оконтуриванию нефтяной залежи (республика Татарстан)

Полевые работы с использованием метода ЗВТ-М проводились в республике Татарстан в 2001 году на Красно-Октябрьском месторождении нефти. Работы проводились силами опытно-методической партии НПУ «Казаньгеофизика».

Ниже представлены краткое описание участка работ, результаты обработки и интерпретации материала, полученного в результате исследований. Обработка осуществлялась с использованием программно-алгоритмической системы «ЗаВеТ-М».

Вся априорная информация по данному участку была предоставлена НПУ «Казаньгеофизика» [39]. Кроме того, весь процесс обработки и интерпретации данных проходил в тесном сотрудничестве с работниками этой организации.

Площадь работ расположена в Западном Закамье на левобережье среднего течения реки Шешмы. Ландшафт местности представляет собой сравнительно невысокое плато, слабо расчлененное овражной сетью. Абсолютные отметки рельефа изменяются от 77 м в поймах ручьев до 152 м на водоразделах. На площади работ расположены населенные пункты Новопоселенная Лебедка и отделение № 2 совхоза Красный Октябрь.

Красно-Октябрьское месторождение открыто в результате глубокого поискового бурения, которое проводится с 1953 года. Это месторождение многопластовое, залежи нефти здесь приурочены к локальным поднятиям и установлены в отложениях среднего и нижнего карбона и в терригенных образованиях верхнего девона.

На рисунке 2.4 показан сводный геологический разрез участка работ.

Нефтяные залежи среднего карбона связаны с карбонатными коллекторами башкирского яруса, верейского и каширского горизонта московского яруса. Нефтяные залежи нижнего карбона приурочены к пористо-проницаемым известнякам турнейского яруса, а также к песчано-алевролитовым породам-коллекторам тульского и бобриковского горизонта визейского яруса. Залежи нефти в терригенном девоне отмечены в пластах кыновского и пашийского горизонта.

За предыдущие годы в районе исследований выполнен комплекс геолого-геофизических работ, включающий структурно-геологическую аэромагнитную и гравиметрическую съемки, электроразведочные (ВЭЗ), сейсморазведочные (МОВ, МОГТ) работы, региональное структурное дешифрирование, структурное, поисково-разведочное и эксплуатационное бурение.

По результатам предшествующих работ были построены предполагаемые контуры нефтеносности, которые представлены на рисунке 2.5.

Электроразведочные работы методом ЗВТ-М выполнялись в весенне-зимний период на площади 40 км² от трех круговых электрических диполей (КЭД) в объеме 694 точки наблюдения (рис. 2.6). Оснащенность полевого отряда: генераторная установка ЭРС-67, аппаратура стабилизации тока в лучах КЭД, цифровой компьютеризированный измеритель переходного сигнала ЦЭИ-5. Пространственно-временная привязка осуществлялась с использованием спутниковой навигационной системы GPS.

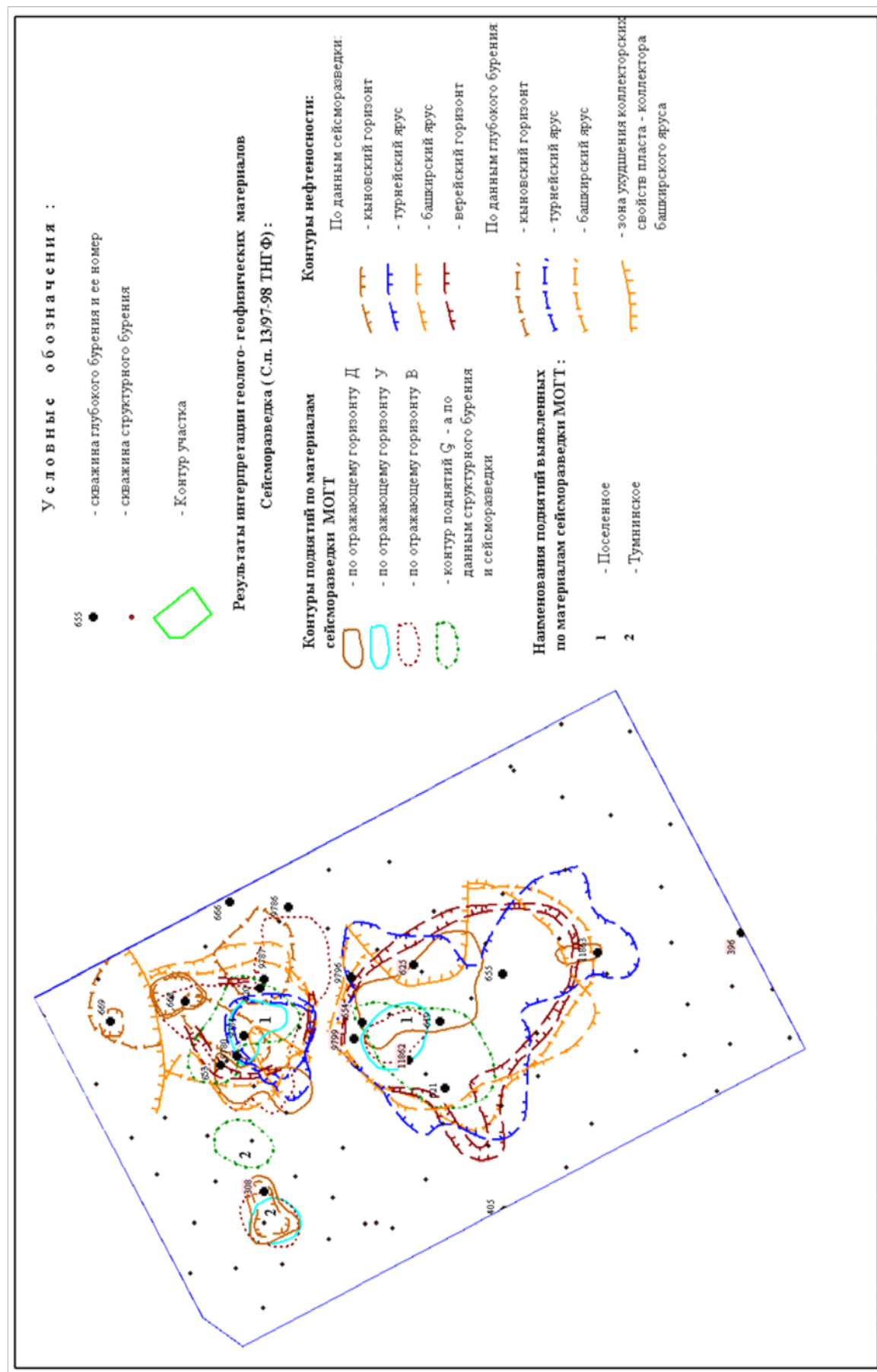


Рис. 2.5 Карта сопоставления результатов ранее проведенных работ.

Съемка велась по равномерной сети наблюдений, при расстоянии между профилями 400 м и шагом наблюдений 200 м со сгущением до 100 м вблизи предполагаемого контура залежи. В местах проявления промышленных помех, в значительной степени искажавших сигнал, (при приближении к населенным пунктам и линиям электропередач) наблюдения не проводились.

С северо-запада на юго-восток район исследований пересекают линия электропередач и газопровод. Высокий уровень помех от последних обусловил некоторую неравномерность сети пунктов наблюдений ЗВТ-М.

Монтаж КЭД производился за пределами площади исследования, но в непосредственной близости от него. Установки КЭД имели по 8 лучей, радиус каждого луча равнялся 750 метров.

Работы проведены с током в лучах 4 Ампера, т.е. суммарный импульс был равен 32 Амперам. Ввод тока в землю осуществлялся стальными стержневыми заземлителями.

Регистрация вертикальной B_z компоненты электромагнитного поля осуществлялась электроразведочным измерителем ЦЭИ-5 с использованием индукционного малогабаритного датчика, представляющего собой компактный аналог приемной петли и состоящий из многовитковой рамки и предварительного усилителя с малым уровнем шумов. На выходе датчик эквивалентен петле площадью 203500 м².

Основной задачей при проведении предварительной обработки материала было определение качества измерений, отбраковка зашумленных данных и определение приоритетности полевых файлов, измеренных от разных КЭД.

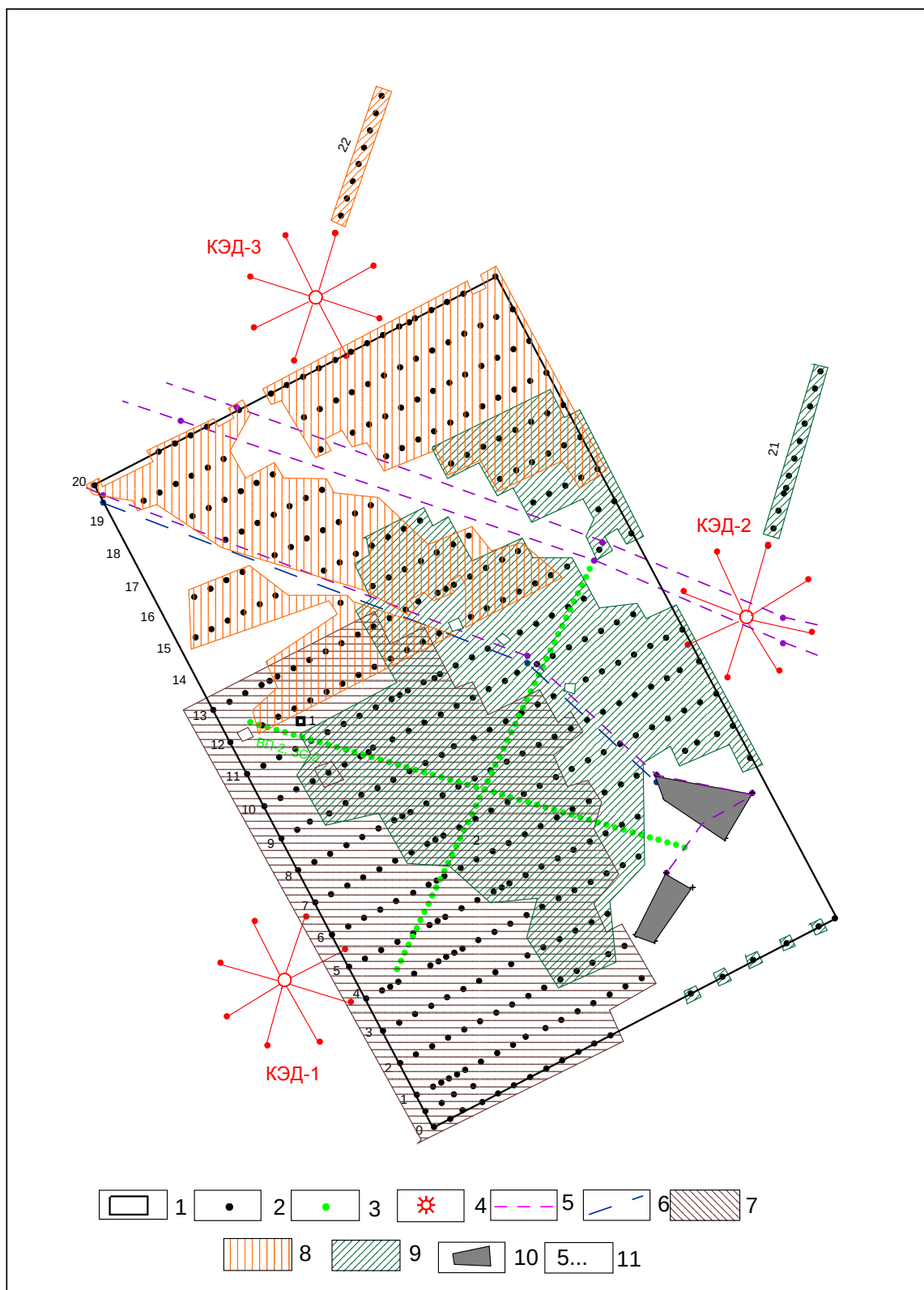


Рис. 2.6 Схема электроразведочных работ методами ЗВТ, ВП.

0.5 0 0.5 1 1.5 2 км

1-контур площади работ, 2-пикеты наблюдений ЗВТ, 3-пикеты наблюдений ВП, 4-КЭД, 5-ЛЭП, 6-газопровод, 7-контур отработанных точек от КЭД-1, 8-контур отработанных точек от КЭД-2, 9-контур отработанных точек от КЭД-3, 10-населенный пункт, 11-профиль наблюдения, номер.

Большинство измерений на пикетах были сделаны без дублей, то есть на каждой точке измерялся только один файл. Это связано с большим объемом работ и ограниченностью временных и материальных ресурсов. Соответственно, та часть предварительной обработки, которая включает отбор наилучшего материала из некоторого количества дублей, практически не проводилась.

Были построены предварительные площадные сигналы ЗВТ-М на различных временах. В качестве основного было выбрано время 21 мс. Время было выбрано исходя из двух критериев, описанных в предыдущей главе. На данном времени площадной сигнал ЗВТ-М наиболее информативен, на нем четко виден контур аномального сигнала. Кроме того, как показала дальнейшая привязка по глубине, это время соответствует глубине ≈ 700 метров, что соответствует интересующим нас глубинам.

В качестве нормировочных коэффициентов, или, что то же самое, степени зависимости сигнала от разноса, были выбраны те, которые были автоматически рассчитаны программой «ЗаВеТ-М». Эти коэффициенты для первого КЭД равнялись 2.5, для второго 1.4, для третьего 0.9. Разброс в них по-нашему мнению объясняется различной степенью зашумленности материалов от разных КЭД. Как показывает опыт предыдущих работ, обычно степень зависимости сигнала от разноса близка к 2.5, что и наблюдается в первом КЭД. При ухудшении качества данных отклонение в этом коэффициенте от 2.5 может расти, что и наблюдается в нашем случае.

На рисунке 2.7 показан площадной сигнал ЗВТ-М на времени 21 мс, построенный с использованием пакета «Surfer». На рисунке четко выделяется зона аномального сигнала, показанная красным цветом. Выделение таких зон и является целью построения подобных площадных сигналов. В дальнейшем эти аномальные зоны интерпретируются в соответствии с геологической ситуацией на участке работ.

Следующим пунктом обработки данных является построение профильных сигналов ЗВТ-М. Перед построением этих сигналов, как описано в предыдущей главе, требуется определить следующие параметры: среднее сопротивление геоэлектрического разреза на участке работ, временной нормировочный коэффициент и коэффициент, отвечающий за привязку по глубине.

Таблица 2.1

№№ п/п	H (м)	h (м)	ρ_i (Омм)	Si (См)
1	600	600	23,2	25,9
2	800	200	6,4	31,1
3	1100	300	38,0	7,9
4	1700	600	65,0	9,2
5	1840	140	11,7	12,0

В таблице 2.1 приведена сводная геоэлектрическая модель осадочного чехла. Исходя из этой информации, было определено среднее сопротивление среды равное 30 Омм.

Роль временного нормировочного коэффициента, как уже говорилось, состоит в подавлении зависимости интенсивности сигнала от времени измерения. При построении профильных сигналов этот коэффициент составил 0.5.

Определение коэффициента, отвечающего за привязку по глубине, осуществлялось с привлечением геологической информации, и он составил 1.1.

С использованием этих данных были построены профильные сигналы вдоль различных профилей. На рисунке 2.8 приведены сигналы по профилям 7 и 9. Соответствие профильных сигналов и априорной информации примерно одинаково для всех профилей, поэтому все они не приводятся, а анализируются два наиболее качественных и информативных.

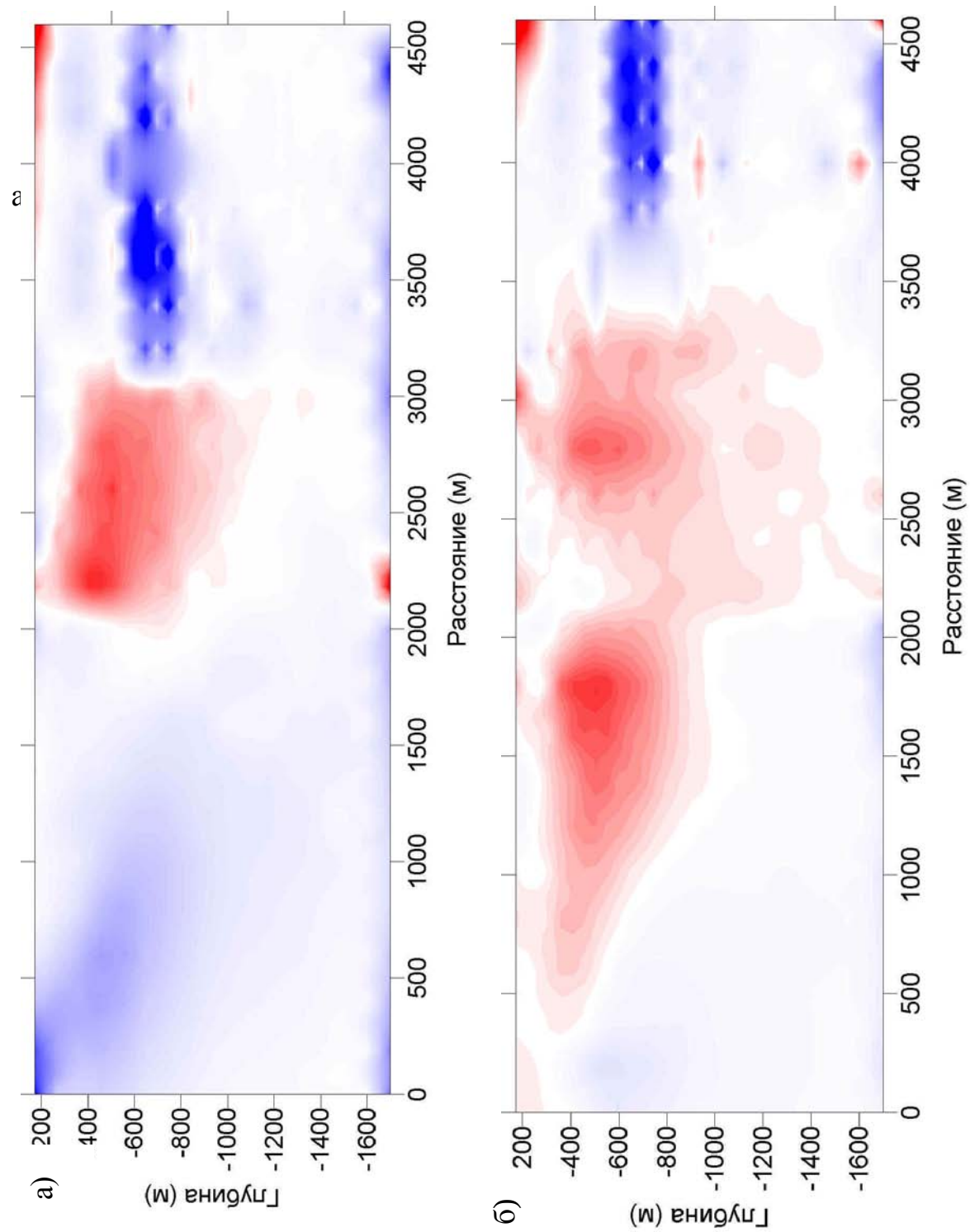


Рис. 2.8 Профильные сигналы ЗВТ-М: а) профиль 7, б) профиль 9.

На изображениях профильных сигналов, также как и на площадной картинке, четко видны области аномального сигнала, показанные красным цветом.

Изображения площадного и профильного сигналов ЗВТ-М были сопоставлены с использованием априорной информации, которая включала в себя данные, полученные на данном участке с использованием других методов исследований (3D-сейсморазведка, гравиразведка, ВП, бурение скважин).

Априорная информация позволила сделать привязку по глубине, исходя из расположения трещиноватых пород, в которые проникают углеводороды из нефтеносных горизонтов карбона. Определение коэффициента привязки осуществлялось по профильному разрезу 7, так как полевой материал вдоль этого профиля был наиболее качественен. Далее найденный коэффициент привязки использовался для построения других профильных сигналов ЗВТ-М без изменения.

Сопоставляя данные по глубинам нефтеносных горизонтов с профильными сигналами ЗВТ-М можно сказать, что на профилях 6, 7, 9, 10 нижняя граница положительного аномального сигнала совпадает с нижней границей нефтяных горизонтов в карбоне. Для других профилей не было сделано данное сопоставление из-за двух причин. Первая – отсутствие близкорасположенных скважин с отбивкой горизонтов по глубинам, вторая – излишняя зашумленность полевых материалов (данные от КЭД-3).

Положительная аномалия, четко выделяющаяся на всех профильных сигналах ЗВТ-М, пересекающая предполагаемый контур нефтяной залежи в карбоне, по нашему мнению обусловлена наличием ареола повышенного сопротивления, расположенной непосредственно над залежью, являющегося следствием проникновения углеводородов в вышележащие относительно залежи слои.

Исходя из контуров нефтеносности по данным 3D-сейсмики и глубокого бурения для различных горизонтов и ярусов, был составлен обобщенный контур нефтеносности. Этот обобщенный контур также показан на изображении площадного сигнала ЗВТ-М (рис. 2.7).

Площадной сигнал ЗВТ-М построен на времени 21 мс, что соответствует ≈ 700 м. Исходя из профильных сигналов ЗВТ-М, на этой глубине над залежью расположена область повышенного электрического сопротивления, и ее мы должны видеть в изображении площадного сигнала.

Эта область четко выделяется в изображении площадного сигнала в виде положительного аномального сигнала. Из рисунка видно достаточно хорошее совпадение контура нефтеносности по сейсморазведке и положительного аномального сигнала ЗВТ-М. То есть, можно сказать, что положительный аномальный сигнал ЗВТ-М обусловлен наличием ореола повышенного сопротивления над залежью. Причем этот ореол достаточно хорошо совпадает с предполагаемым контуром залежи нефти в карбоне по данным 3D-сейсморазведки.

Также были сопоставлены данные наличия нефти в скважинах из карбона с контуром аномального сигнала в площадном сигнале ЗВТ-М. Проведенный анализ показал, что скважины с нефтеносными горизонтами в карбоне (скважины 621, 619, 11862, 625 и др.) попадают в полученный нами контур, а те, в которых отсутствует нефть из карбона (скважины 308, 669, 11863, 9786) в наш контур не попадают.

При проведении данных полевых работ были также сделаны измерения методом ВП вдоль двух профилей, показанных на рисунке 2.7. По результатам этих измерений были получены аномальные зоны, выделенные в поле ВП, соответствующие залежам углеводородов (см. рис. 2.7). Эти зоны также достаточно хорошо совпадают с границами положительной аномальной области в площадном сигнале ЗВТ-М.

В изображении площадного сигнала четко видны линейные области отрицательных значений, распространенные в южной области площади. Они могут быть связаны с ослабленными зонами повышенной тектонической трещиноватости в отложениях среднего и нижнего карбона [39]. Обладая повышенными фильтрационными и емкостными свойствами, в случае заполнения их высокоминерализованными водами, проводимость разреза резко возрастает, что обуславливает наличие аномалии отрицательного знака. Подтверждением тому, может являться достаточно высокая сходимость этих аномалий с неогеновыми долинами, установленными бурением и уточненным по данным гравirazведки.

В результате проведенного анализа априорных данных и материалов, полученных с помощью метода ЗВТ-М, можно сказать, что на площадном и профильных сигналах ЗВТ-М мы видим ореол повышенного сопротивления над залежью нефти. Контур этой области повышенного сопротивления хорошо согласуется с предполагаемым контуром нефтеносности по данным 3D-сейсморазведки. Кроме того, наш контур также согласуется с данными по бурению скважин и результатам измерений методом ВП.

После привязки профильных сигналов по глубине, было получено хорошее совпадение по глубине нижней границы залежи в карбоне и нижней границы аномальной зоны на изображениях профильных сигналов ЗВТ-М для нескольких профилей.

Результатом полевых работ и обработки данных являются построенные площадные и профильные сигналы ЗВТ-М. Контур залежи, полученный в изображениях этих сигналов, достаточно хорошо согласуется с результатами проведенных ранее на этом участке работ и геологией района исследований. Кроме того, на этом участке были впервые сделаны полноценные работы и интерпретация данных от нескольких постановок КЭД.

При обработке первичных данных на Краснооктябрьском месторождении интенсивно использовался программный комплекс «ЗаВеТ-

М». С его использованием удалось качественно сделать нормировку сигналов в зависимости от расстояния при построении площадных сигналов ЗВТ-М, нормировку по глубине и амплитуде для построения профильных сигналов ЗВТ-М, а также удалось совместить данные от 3-ех независимых установок КЭД, которые дали в сумме качественный площадной сигнал.

Это показывает эффективность созданного комплекса при решении задач нормировки и построения площадных и профильных сигналов ЗВТ-М.

2.2.2 Экспериментальные работы в пределах Норильского рудного поля

В августе 2005 года были проведены полевые работы методом ЗВТ на Черногорском месторождении Норильского рудного поля. Целью работ являлось апробация метода ЗВТ при поисках рудных месторождений, оценка работоспособности методики ЗВТ в условиях многолетней мерзлоты, тестирование алгоритмов обработки, анализа и визуализации сигналов ЗВТ.

Черногорское медно-никелевое месторождение приурочено к Черногорскому интрузиву, который расположен в северо-восточной части Норильской мульды восточнее интрузива Норильск-1 [55]. Он залегает в межформационном шве между отложениями тунгусской серии и разведочнинской свиты в своей восточной части, а в западной части – среди девонских отложений. Интрузив имеет субширотную ориентацию в соответствии с направлением магмолокализирующей структуры – Ергалахско-Быстринской зоны разломов северо-западного простирания. В пределах этой зоны интрузив раздваивается в плане, образуя северную собственно Черногорскую и южную Тупиковую ветви.

Черногорская ветвь представляет собой хонолитоподобное лентовидное тело протяженностью 7-8 км, шириной 1,5-2,2 км и максимальной мощностью 365 м. В своей восточной части ветвь имеет трубообразную форму с острым клиновидным бортом и утолщенным, расщепленным по вертикали на несколько тел северным бортом. В западной

части ветвь представляет собой линзо- и пластообразную интрузивную залежь. Значительная часть этой ветви эродирована на г. Черной. Геологическая карта района Черногорской интрузии представлена на рис. 2.8 [6].

К нижним горизонтам Черногорского интрузива – пикритам, такситовым и контактовым габбродолеритам приурочено сульфидное медно-никелевое оруденение. Минерализация вкрапленная. Рудные минералы представлены пирротинном, халькопиритом, пентландитом, кубанитом. Мощность рудной зоны изменяется от 10 до 80 м.

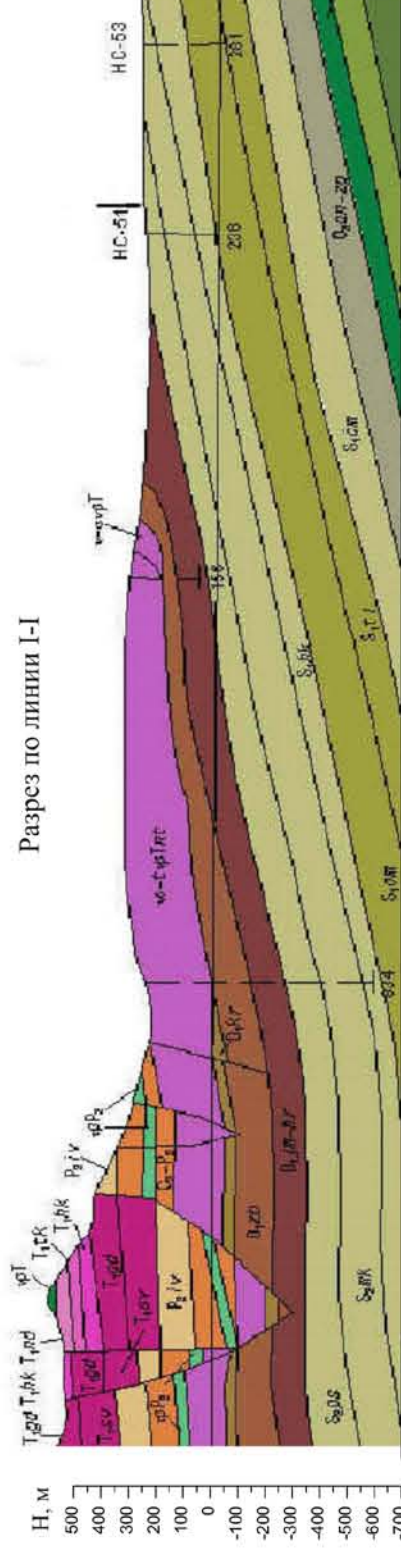
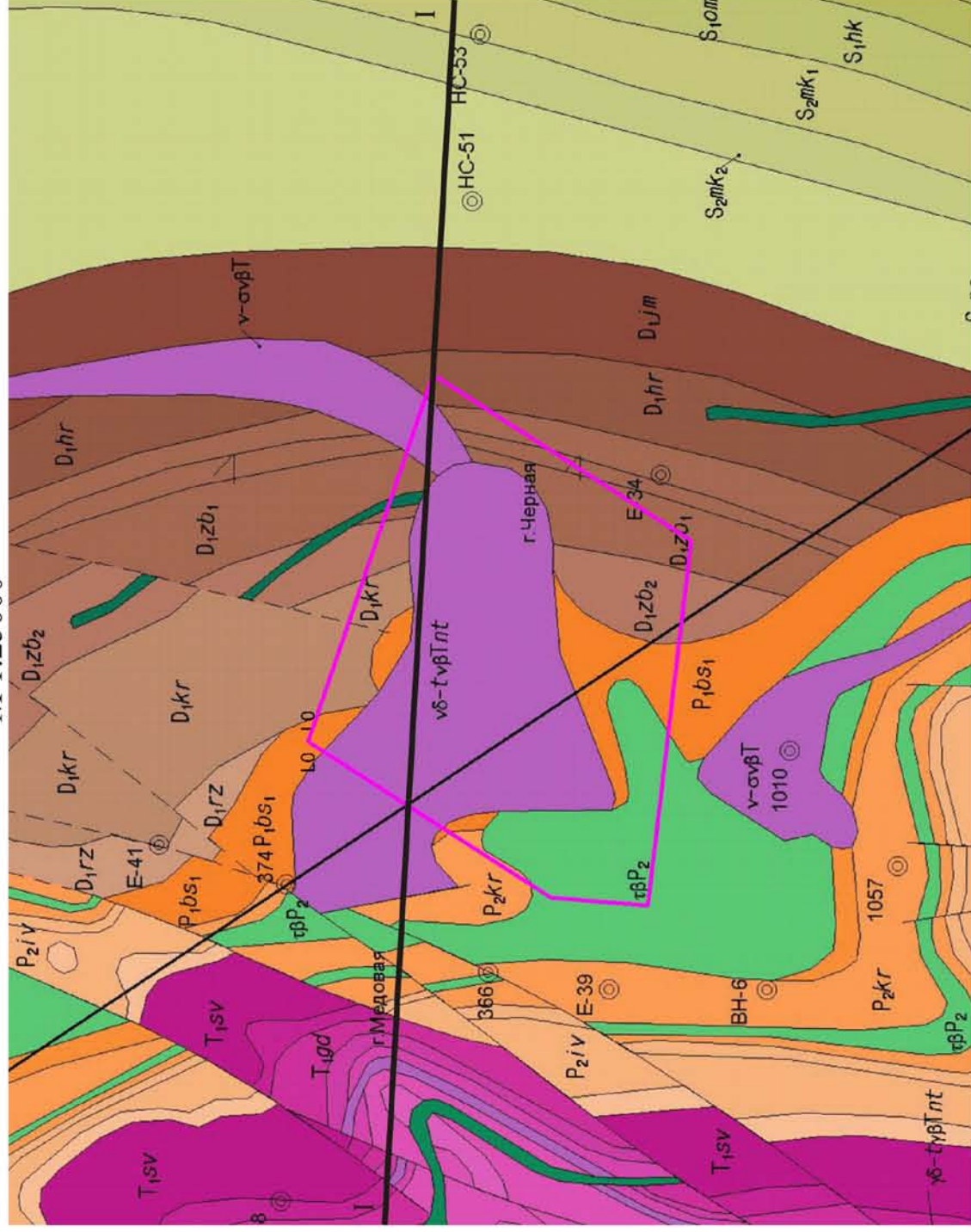
Участок работ располагался непосредственно в области выхода Черногорской интрузии на поверхность. Площадь участка составляла примерно 3.5 кв. км.

Работы методом ЗВТ проводились по стандартной методике с одной расстановкой КЭД. Длина лучей КЭД составляла 500 м. Заземление осуществлялось стальными электродами длиной 1 метр. Каждый луч КЭД заземлялся 15 электродами. В центре установки было вбито порядка 50 электродов. Все электроды вбивались на минимальном расстоянии 2 метра друг от друга.

Питающий дизельный генератор находился на удалении 700 метров от центра КЭД в стороне от участка работ. Дизель соединялся с генераторной аппаратурой посредством длинного кабеля. В последствие пришлось исключить из обработки несколько точек измерения в связи с тем, что они находились в непосредственной близости от питающего кабеля и были зашумлены помехой.

Перед началом измерений проводилась настройка генераторной и измерительной аппаратуры.

M 1:25000



Составлено на основе "Геологическое строение и полезные ископаемые центральной части Норильского промышленного района. Геологическая карта дочетвертичных образований М 1:50000". МинГео СССР, 1981 г.

Триасовая система

T ₁ nd	Надеждинская свита. Полифидовые и порфиритовые базальты, гломмеропорфиритовые базальты.
T ₁ tk	Туклонская свита. Пойкилофидовые, толентовые базальты с редкими горизонтами туфов и туфопесчаников.
T ₁ hk	Хаканчанская свита. Алевро-псаммитовые туфы и туфиты
T ₁ gd	Гудчихинская свита. Базальты порфиритовые, горизонты туфов и туфитов.
T ₁ sv	Сыверминская свита. Пачки толентовых и пойкилофидовых базальтов; в основании невыдержанный горизонт туфитов.
P ₂ iv	Ивакинская свита. Трахибазальты, андезит-базальты, туфы, туфиты, туфогенно-осадочные породы, в том числе, туфобрекчии.
P ₂ kr	Кайерканская свита. Песчаники, аргиллиты, алевролиты с мощными пластами каменных углей.
P ₁ bs ₁	Быстринская свита. Аргиллиты, песчаники с прослоями известняков.

Девонская система

D ₁ rz	Разведочинская свита. Чередование пачек черных аргиллитов и известняков. В основании полимиктовые песчаники.
D ₁ kr	Курейская свита. Мергели и аргиллиты пестроцветные и зеленовато-серые.
D ₁ zb _{1,2}	Зубовская свита. Переслаивание пестроцветных алевролитовых мергелей массивных и грубослоистых с ангидритами и глинистыми доломитами.
D ₁ hr	Хребтовская свита. Мергели темно- и зеленовато-серые и ангидриты тонкоритмичнослоистые.
D ₁ jm	Ямпахтинская свита. Известняково-аргиллитовая и известняково-доломитовая фации. Сероцветные доломиты с прослоями ангидритов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

S ₁ ps	Постичная свита. Сероцветные доломиты с пропластками мергелей и доломитов обломочных.
S ₁ mk ₂	Верхнемакусская подсвита. Доломиты слоистые, мелкообломочные с прослоями глинистых известняков, мергелей и глинистых доломитов.
S ₁ mk ₁	Нижнемакусская подсвита. Мергели с прослоями доломитистых известняков.
S ₁ hk	Хюккинская свита. Известняки биостромные, глинистые известняки, доломиты серые, мергели с линзами и желваками кремней.
S ₁ om	Омнутахская свита. Аргиллиты известковые, мергели известковые, известняки глинистые с прослоями известняков.
S ₁ tl	Таликитская свита. Известняки глинистые, комковатые, бугристонаслоенные, в переслаивании с мергелями.
S ₁ cm	Чамбинская свита. Известняки глинистые, мергели зеленовато-серые, аргиллиты.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.

Силурийская система

S ₂ mk ₂	Верхнемакусская подсвита. Доломиты слоистые, мелкообломочные с прослоями глинистых известняков, мергелей и глинистых доломитов.
S ₂ mk ₁	Нижнемакусская подсвита. Мергели с прослоями доломитистых известняков.
S ₁ hk	Хюккинская свита. Известняки биостромные, глинистые известняки, доломиты серые, мергели с линзами и желваками кремней.
S ₁ om	Омнутахская свита. Аргиллиты известковые, мергели известковые, известняки глинистые с прослоями известняков.
S ₁ tl	Таликитская свита. Известняки глинистые, комковатые, бугристонаслоенные, в переслаивании с мергелями.
S ₁ cm	Чамбинская свита. Известняки глинистые, мергели зеленовато-серые, аргиллиты.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.

Ордовикская система

O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.
O ₂ an	Ангирская свита. Известняки темно-серые, комковатые, органогенные. В кровле известняки кремнистые, в основании песчаные.

Инtruзии

g ₁ ch	Позднепермский субвулканический комплекс. Мелкие субластовые тела и силлы. Недиференцированные интрузии титан-автитовых долеритов и трахидолеритов. Норильско-талнахская группа. Полнодифференцированные от габбро-диоритов и лейкократовых габбро до пикритовых габбро-долеритов. Субластовые и полостосекущие тела.
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела
g ₁ ch	Апофизы дифференцированных рудосносных интрузий. Лейкократовые габбро, оливинсодержащие и оливиновые габбро-долериты. Дайки и субластовые тела

Скважины

Контур участка работ методом ЗВТ

Рис. 2.8 Геологическая карта района Черногорской интрузии Норильского рудного поля

Для стабильной работы генераторного комплекса ЗаВеТ обеспечивалось примерно одинаковое сопротивление в каждом луче, которое составляло порядка 45 Ом, кроме пятого луча, сопротивление заземления которого составило около 70 Ом. Данный луч заканчивался на берегу ручья, где были сложные условия заземлений (каменистый берег). В связи с относительно высокими сопротивлениями заземлений суммарный ток в питающей установке КЭД не превышал 12 А.

Измерительная аппаратура состояла из трех комплектов ЦЭИ-5 с индукционными датчиками. Сравнение измеряемого сигнала с тестовыми сигналами показало, что все комплекты не требовали дополнительной настройки, что позволило начать работу после подготовки генераторного комплекса. Топографическая привязка точек наблюдения осуществлялась с помощью системы GPS.

Каждый день перед началом измерений все измерительные отряды проводили сравнение измеренных сигналов на контрольной точке, чтобы убедиться в правильности работы генераторной установки и в правильной работе всех измерительных комплексов.

Измерения проводились тремя полевыми отрядами одновременно и независимо друг от друга, то есть каждый измерительный комплекс был автономен. В измерениях участвовали также и работники «Норильскгеология», которым был показан и ими опробован весь процесс измерений.

Расстояние между профилями составляло 100 м, шаг по профилю – 50 м. Общий объем измерений составил 580 точек. На каждой точке выполнялось от 2 до 4 измерений (дублей) в зависимости от уровня помех.

В конце каждого дня все измеренные кривые подвергались предварительной обработке для того, чтобы выявить некачественно или неправильно отснятые точки и в дальнейшем выполнить повторные замеры на них.

Отличительными особенностями работ на Черногорском месторождении являлось то, что плохие условия заземлений и мерзлое состояние пород обуславливали низкий ток в генераторной линии (до 12А), вследствие чего измеряемые сигналы были малой амплитуды на фоне высокого уровня помех. Пример измеренных зашумленных сигналов ЗВТ показан на рис. 2.10.

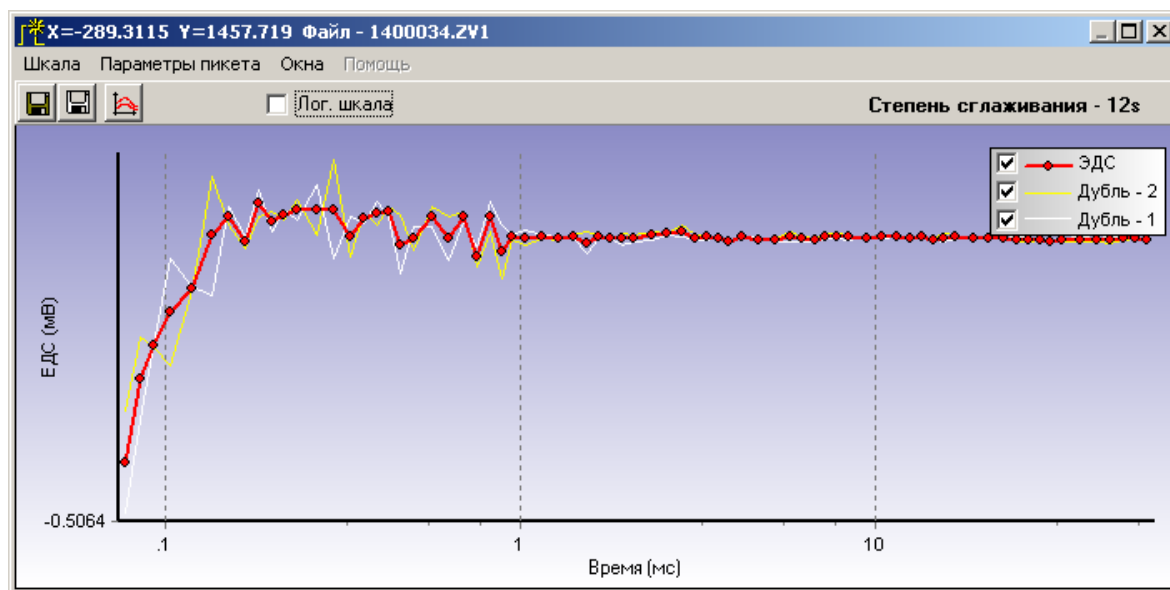


Рис. 2.10. Пример измеренных сигналов на одном пикете: белый и желтый – измеренные дубли, красный – результирующая сглаженная кривая.

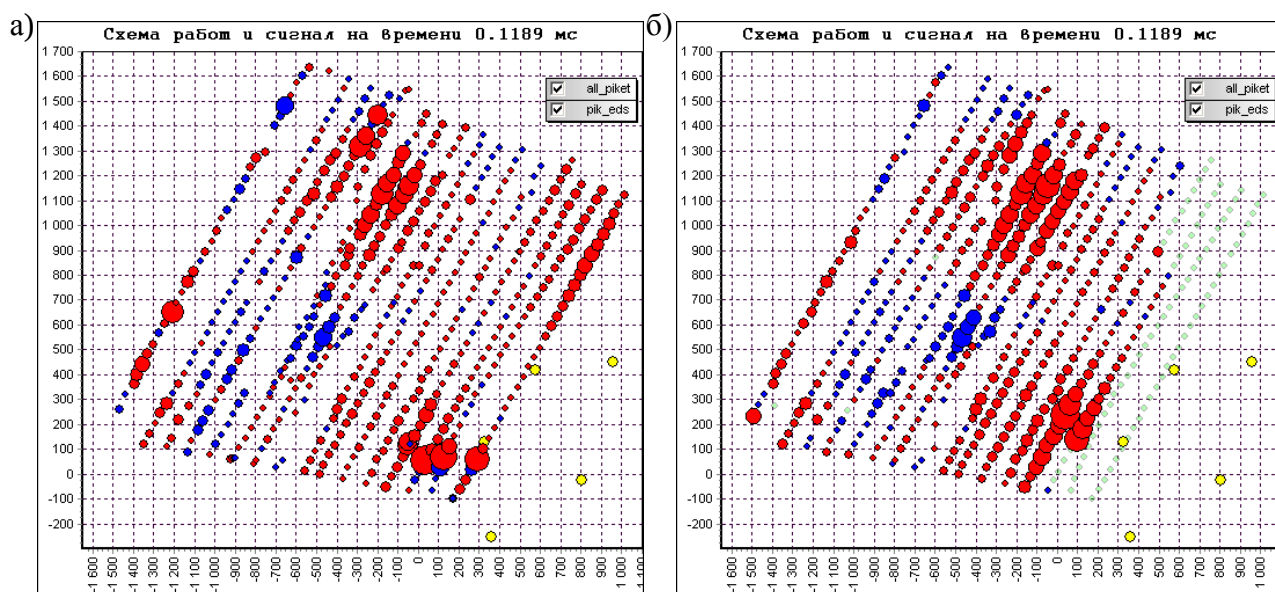


Рис. 2.11. Площадной сигнал ЗВТ в пределах Черногорской интрузии до предварительной обработки (а) и после (б).

В результате применения разработанных алгоритмов обработки и фильтрации данных удалось получить качественный материал, пригодный для дальнейших построений.

В итоге предварительной обработки было забраковано 88 точек (в основном это точки снятые в первый день измерений). В окончательную обработку пошли сигналы с 454 точек измерения. На рисунке 2.11 показаны площадные сигналы ЗВТ на времени 0.118 мс до и после предварительной обработки.

Как видно из рисунка качественно картина сигналов не меняется, но импульсных выбросов на отдельных точках становится заметно меньше.

В процессе дальнейшей обработки полевых данных были построены планы изолиний сигнала ЗВТ на различных временах для того, чтобы увидеть распределение сигнала по площади на разных глубинах (рис 2.12).

Для построений планов изолиний были выбраны времена 0.06, 0.103, 0.18, 0.88 мс, как наиболее типично показывающие эволюцию площадного сигнала при изменении времени.

Площадной сигнал на времени 0.06 мс (рис. 2.12) характеризуется мозаичным строением и отражает неоднородное строение верхней части разреза. Анализ структуры сигнала показывает, что поверхностные слои не имеют четкой горизонтально слоистой структуры. Возможно, это связано с разной степенью выветривания приповерхностных слоев или неоднородным геокриологическим строением, что сильно влияет на электрическую проводимость этих слоев.

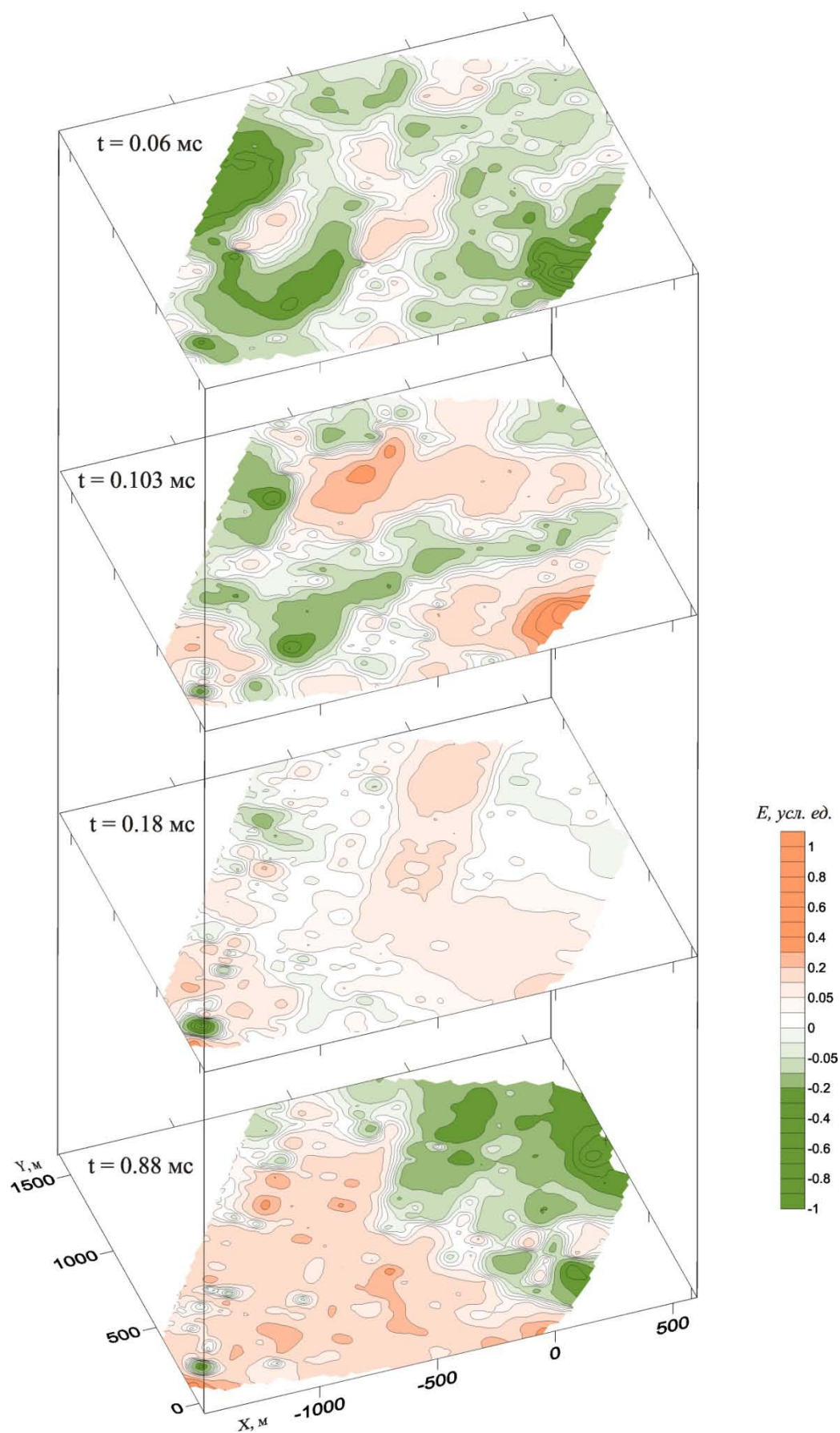


Рис. 2.12. Планы изолиний сигнала ЗВТ на разных временных задержках. Черногорское месторождение Норильского рудного поля.

Несколько глубже, на времени 0.103 мс на плане изолиний сигнала ЗВТ высокоамплитудными аномалиями отчетливо начинает проявляться геологическая структура. Здесь по границе смены знака сигнала можно оконтурить геологические объекты на площади исследований. Судя по форме границ, на этом временном срезе выделяется собственно Черногорская интрузия габбро-долеритов, а также приконтактово-измененные и вмещающие породы.

На максимальной глубине исследований ($t = 0.88$ мс) на плане изолиний по смене знака сигнала четко выделяется латеральная неоднородность субмеридионального простирания. Вероятнее всего выделяемая неоднородность является одним из структурных элементов Ергалахско-Быстринской зоны разломов северо-западного простирания.

Рассмотрим подробнее план изолиний сигнала ЗВТ на времени 0.103 мс (рис. 2.13). Для определения глубины, которой соответствует интересующее нас время (0.103 мс) было проведено 3D-моделирование. По известной одномерной модели, которая была получена в ходе работ ЗСБ на этом участке ранее, была построена среда и аномальный объект с соответствующим сопротивлением. В ходе сравнения результатов моделирования и измеренного сигнала было установлено, что кажущаяся глубина для времени 0.102 мс при данных геоэлектрических условиях составляет порядка 200 метров. Из геологических данных известно, что максимальная мощность Черногорской интрузии составляет 365 м при средней мощности около 200 м. Таким образом, план изолиний сигнала ЗВТ на времени 0.103 мс отражает латеральные неоднородности собственно в интрузивном массиве и характеризует пространственное изменение контуров интрузии, приконтактово измененных пород и границу вмещающих пород.

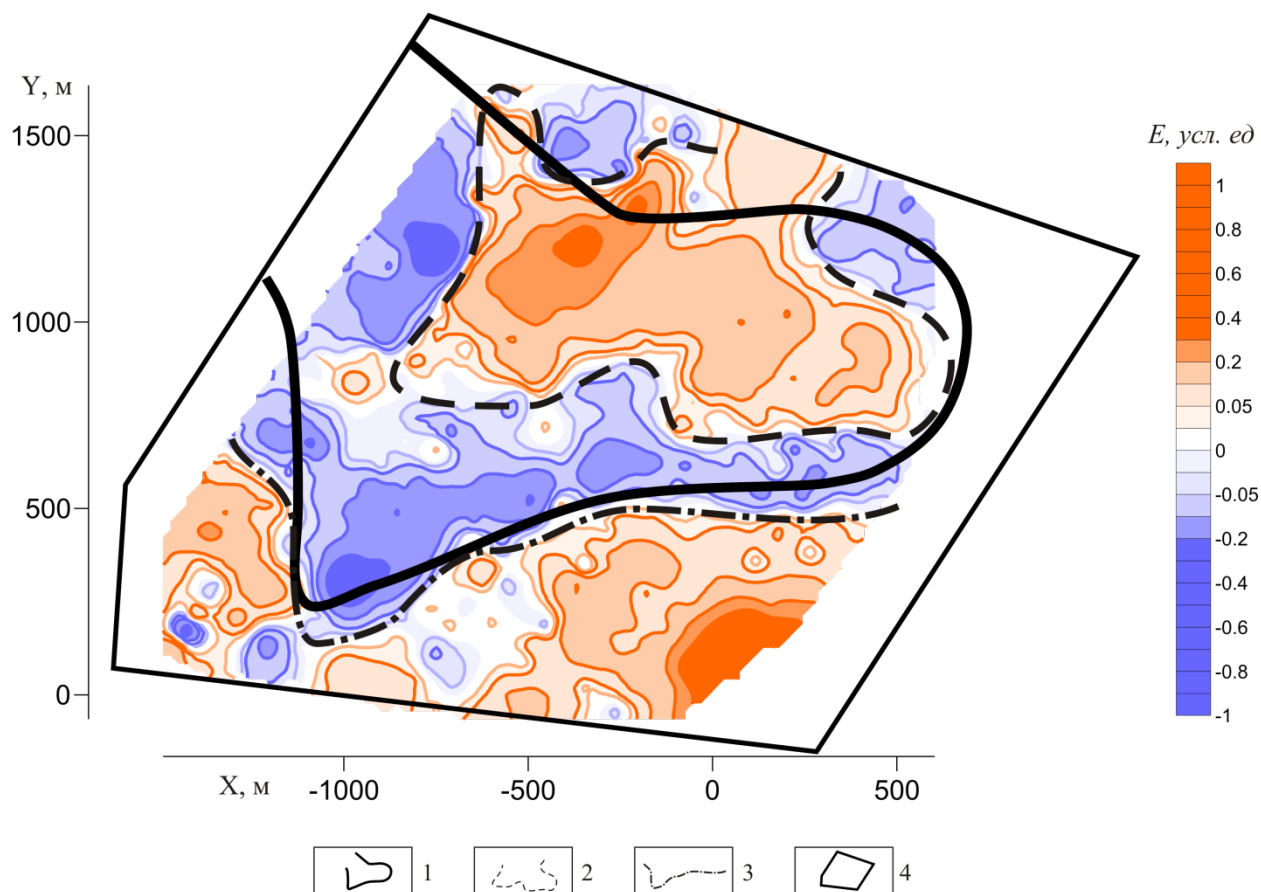


Рис. 2.13 . План изолиний сигналов ЗВТ на времени 0.103 мс по Черногорскому месторождению. 1- контур интрузии по геологическим данным; 2- граница неизменных габбро-долеритов по данным ЗВТ; 3- граница приконтактово измененных и вмещающих пород по данным ЗВТ; 4- контур участка работ.

Сопоставление плана изолиний с геологической информацией показывает следующее (рис. 2.13). По изменению полярности сигнала на площади исследований выделяется два контура. Первый контур (штриховая линия) пространственно совпадает с центральной частью интрузии и, по-видимому, отображает границу неизменных габбро-долеритов, выходящих на поверхность. Второй контур (штрихпунктирная линия) проходит по южной геологической границе интрузии. Известно [55], что с южной стороны Черногорской интрузии развита мощная зона приконтактового метаморфизма. По всей видимости, контур, выделяемый по данным ЗВТ, и является границей метаморфизованных пород и осадочного комплекса.

Были попытки построить профильные сигналы ЗВТ вдоль профиля пересекающего границу объекта, но эти попытки успехом не увенчались. Полученные сигналы не несли никакой информации. Это связано с тем, что самое информативное время (0.102 мс) это очень раннее время для процессов которые мы исследуем, и можно сказать, что в этот момент только успело выключиться и затухнуть прямое поле источника. К тому же граница объекта выделяется на 3-4 временах, что не является достаточным для четкого выявления аномального объекта на профильном сигнале. Другими словами мощность объекта меньше чем разрешающая способность по глубине в методе ЗВТ. И именно поэтому не удастся построить четкие информативные профильные разрезы изолиний сигналов ЗВТ.

Также моделирование показало, что даже при токе 1.5 Ампера мы можем достигнуть глубинности порядка 1000 метров. То есть если при проведении дальнейших работ удастся уменьшить сопротивление заземления, можно поднять ток и увеличить глубинность до 1500 метров.

В результате проведенных полевых работ в окрестностях г. Норильска был выделен контур искомого объекта, определена кажущаяся глубина. Кроме того, проверена работоспособность метода ЗВТ по оконтуриванию рудных объектов в условиях Крайнего Севера в районах с вечной мерзлотой.

В процессе обработки первичных данных при работе на Черногорском интрузиве была выявлена высокая эффективность программного комплекса для скорости определения качества первичных данных, используя алгоритмы фильтрации, суммирования и сглаживания удалось получить более качественный материал. Все эти возможности позволили практически в режиме реального времени получать площадные сигналы высокого качества при проведении полевых исследований.

2.3 Выводы

Результатом исследований, описанных во второй главе, являются алгоритмы и подходы к обработке полевых данных, которые реализованы в программно-алгоритмическом комплексе «ЗаВеТ-М».

На основе этого можно сформулировать первый научный результат:
разработаны и программно реализованы алгоритмы обработки данных метода ЗВТ-М для нормировки площадных и профильных сигналов ЗВТ в зависимости от расстояния и времени, сшивки полевых данные от нескольких источников КЭД, проведения предварительной обработки полевых данных.

Глава 3 ЗОНДИРОВАНИЯ ВЕРИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ С ИЗМЕРЕНИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Метод ЗВТ с измерением вертикальной магнитной составляющей является эффективным способом исследования латеральных неоднородностей разреза. Без сомнения актуален вопрос дальнейшего развития метода ЗВТ и использования источника нового типа (КЭД).

Следующим этапом развития, по мнению автора, является измерение, дополнительно к вертикальной магнитной, также и радиальной электрической составляющей электромагнитного поля. Это позволит нам получить информацию о вмещающей среде, которая отсутствует при измерении только магнитной компоненты.

Перед практической реализацией методики измерения электрической составляющей поля от КЭД необходимо понять, насколько это может быть эффективно для решения различного рода геолого-геофизических задач. Необходимо выработать методические рекомендации проведения полевых работ для исключения влияния на результат сторонних факторов, таких как взаимное расположение источника и приемника и их размеры. Кроме того, полезно выявить основные закономерности распространения сигнала в зависимости от различных параметров генераторно-измерительного комплекса.

При исследовании радиальной электрической составляющей поля на измеряемый сигнал, очевидно, могут влиять процессы вызванной поляризации (ВП). Поэтому до практической реализации новой модификации метода ЗВТ необходимо выяснить насколько сильно ВП может изменять наши сигналы.

Необходимо выявить преимущества и недостатки КЭД и ТМ-поле, в сравнении с другими типами установок, например, такими как установка АВМН, при изменении различных параметров геоэлектрического разреза.

Эти исследования позволят понять, как наиболее эффективно использовать установку КЭД-MN при геолого-геофизических исследованиях.

3.1 Становление электрического поля КЭД

Выше мы обсуждали сложившуюся методику ЗВТ, направленную на изучение латеральных неоднородностей и связанную с регистрацией магнитного поля (ЗВТ-М). Нормальное электромагнитное поле электрического типа в горизонтально-слоистой среде (переходной процесс электрического типа) имеет на дневной поверхности (в случае КЭД) только радиальную компоненту электрического поля. Регистрация такой компоненты позволяет изучать вмещающий разрез. Свойства установления этой электрической компоненты – суть свойства ТМ-поля, которые, весьма отличны от известных свойств поля магнитного типа (ТЕ-поля).

Характерные свойства Е-поля в процессе становления впервые заявили о себе еще в известной работе А.Н.Тихонова и О.А.Скугаревской [54], в которой обнаружилась экспоненциально затухающая со временем составляющая в z-компоненте вектора-потенциала. Поскольку авторов интересовала поздняя стадия становления поля, возбуждаемого горизонтальным электрическим диполем, то такой составляющей они пренебрегали и физическая подоплека не обсуждалась. В дальнейшем сложившаяся практика применения линии и петли для зондирования становлением и отсутствие наземного источника Е-поля долгое время держали «в тени» переменное поле электрического типа, мотивы и возможности его использования. Теперь такой источник (КЭД) предложен. Эта питающая установка – практически единственное средство возбуждения с дневной поверхности поля чисто электрического типа. Однако, если рассматривать и погруженные источники, то известен источник, возбуждающий сходную пространственную структуру распределения токов в среде – вертикальный электрический диполь (ВЭД). Действительно, если имеет место соответствие:

$$A = Idz \cdot z_0 = I_0 b^2 / 4, \quad (3.1)$$

где Idz - момент, z_0 - глубина погружения ВЭД, I_0 - ток, b - радиус КЭД, то поздняя стадия становления поля в слое (h, ρ) с изолирующим основанием для КЭД и ВЭД выглядит одинаково. При $t \rightarrow \infty$

$$E_r(t) \approx \frac{A\rho}{\pi h^4} \cdot \frac{r}{h} \cdot \left(\frac{\mu_0 h^2}{2t\rho} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 t \rho}{\mu_0 h^2} \right). \quad (3.2)$$

На рис.3.1 сравниваются поля ВЭД и КЭД (E_r) в более сложной (трехслойной) среде с изолирующим основанием. Примем момент ВЭД $Idz=10000$ А*м и будем погружать на глубину 500 м. КЭД радиусом 500 м и с током 80А будем размещать на дневной поверхности. Градиент электрического поля (E_r) фиксируется на удалении 1000 м. Легко проверить, что параметры ВЭД и КЭД удовлетворяют соотношению (3.1). Глубина до фундамента 2000 м, $\rho=10$ Ом*м. В основание вмещающего слоя помещена S-плоскость (100 См).

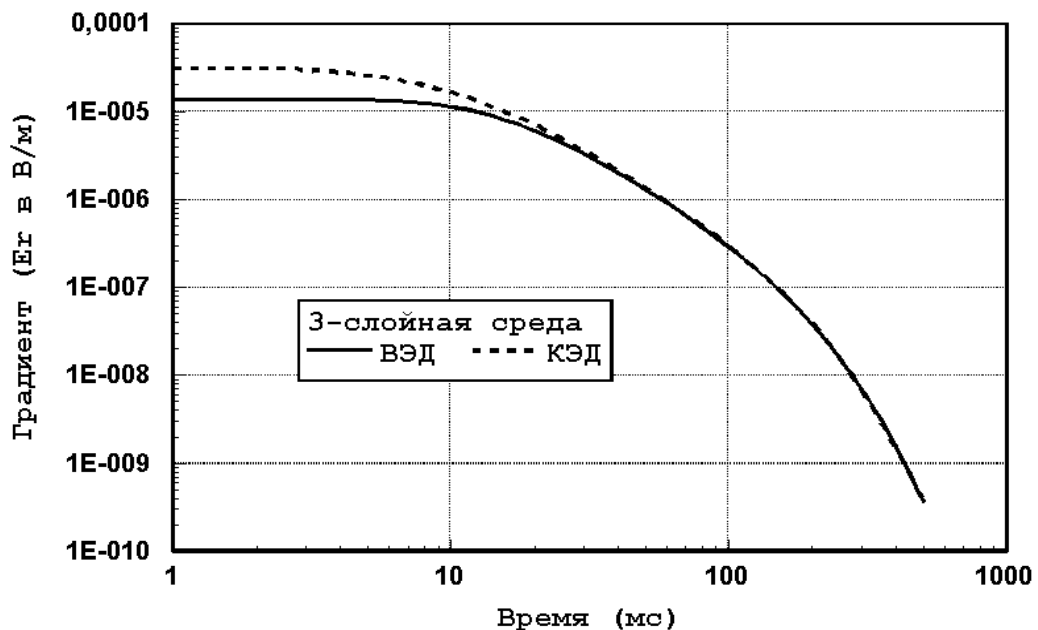


Рис.3.1. КЭД и ВЭД в трехслойной среде.

Аналитические соотношения для простых сред и численные расчеты для более сложных показывают, что КЭД является наземным аналогом вертикальной электрической линии. Оба источника возбуждают только поля

электрического типа, хотя и различным способом (ВЭД – гальванически и индуктивно, КЭД – только гальванически, посредством стекающего с заземлений тока). Однако в процессе становления начинают превалировать общие свойства ТМ-поля над начальными условиями. Вообще, это интересный результат, позволяющий соотнести новый источник (КЭД) с электроразведочной традицией, к которой все же принадлежит вертикальный электрический диполь. Нужно только заметить, что ВЭД, как источник ТМ-поля, малореализуем (прежде всего из-за неvertикальности реальных скважин).

Таким образом, мы можем говорить о свойствах Е-поля, подразумевая его в составе полного поля, возбуждаемого произвольным (смешанным) источником или в качестве полного поля, возбуждаемого ВЭД и КЭД. Свойства эти (например, В.С.Могилатов, 1998г. [27]), разительно отличаются от свойств Н-поля. Н-поле (ТЕ-поле) имеет только горизонтальные компоненты электрического поля и, соответственно, образует систему только горизонтальных токов, зависящую только от горизонтального сопротивления (знаменитое «токовое кольцо», возбуждаемое петлей). ТМ-поле (от КЭД или ВЭД) образует тороидальную систему токов, замыкающихся в вертикальных плоскостях (и поэтому его поле зависит и от горизонтального сопротивления и от вертикального) (рис. 3.2).

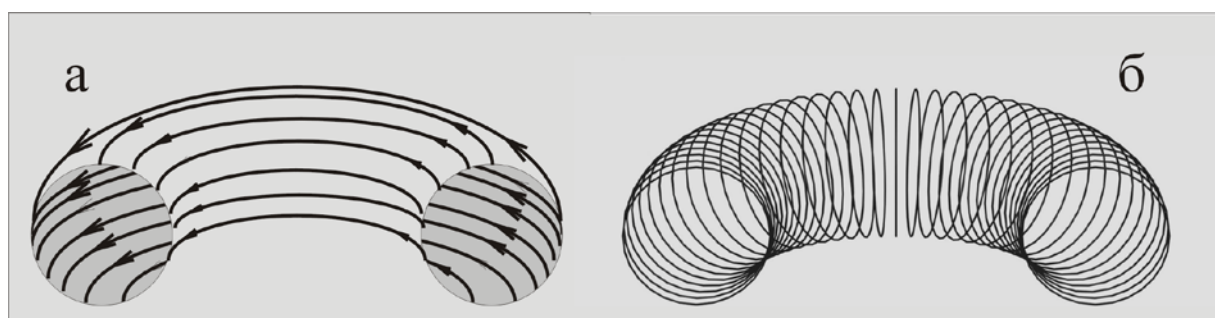


Рис. 3.2. Система горизонтальных токов, возбуждаемая петлей и тороидальная система токов (КЭД, ВЭД).

Выше мы видели, что в среде с изолирующим основанием электрическое поле спадает со временем экспоненциально. Это весьма необычно для традиционных ЗС. Такое свойство обеспечивает высокую разрешающую способность зондирований с применением Е-поля. Мы должны только убедиться, что случай изолирующего основания не является особым теоретическим вырожденным случаем, а, напротив, отражает реальную ситуацию при увеличении контраста сопротивлений основания и вышележащей толщи.

Как и в предыдущем примере, примем КЭД радиусом 500 м и с током 80 А. Электрическое поле (E_r) фиксируется на удалении 1000 м линией длиной 500 м. Глубина до фундамента 2000 м, $\rho=10$ Ом*м. Сопротивление основания примем бесконечным, 1000 Ом*м и 100 Ом*м. Мы видим на рис. 3.3. что даже при контрасте всего в 10 раз имеется участок спада (до 200 мсек), близкий к экспоненциальному. Это означает, что уникальная чувствительность поля КЭД сохраняется и при конечной проводимости основания.

Сравним теперь на синтетическом материале аномальные эффекты при применении традиционной установки “петля-петля” (общий момент – 10^{13} А*м⁴, разнос 1000м) и установки КЭД-MN (радиус 500м, ток 80А, приемная линия 500м, центр ее на 100м от центра КЭД). Параметры установок приближены к реальным. Вмещающая среда – как в предыдущем примере (2000 м, $\rho=10$ Ом*м). Сопротивление основания примем 1000 Ом*м (не изолятор!). В качестве аномального объекта поместим проводящий тонкий слой (50 м $\rho=0.5$ Ом*м) в основание вмещающего слоя. Таким образом, продольная проводимость вмещающей толщи 200 См, а объекта – 100 См. На рис.3.4 представлены кривые относительных аномальных эффектов (в процентах) для сигналов от традиционной установки (ТЕ) и от установки КЭД-MN (ТМ). Причем, сигнал от каждой установки фиксировался до уровня в 1 мкВ. Мы видим, что ТМ-процесс много быстрее и дает

экспоненциально растущий аномальный эффект (в измеряемом диапазоне до 1400%). Для установки “петля-петля” кривая медленно стремится к теоретическому максимуму в 227% (но достигает в измеряемом диапазоне только едва 100%).

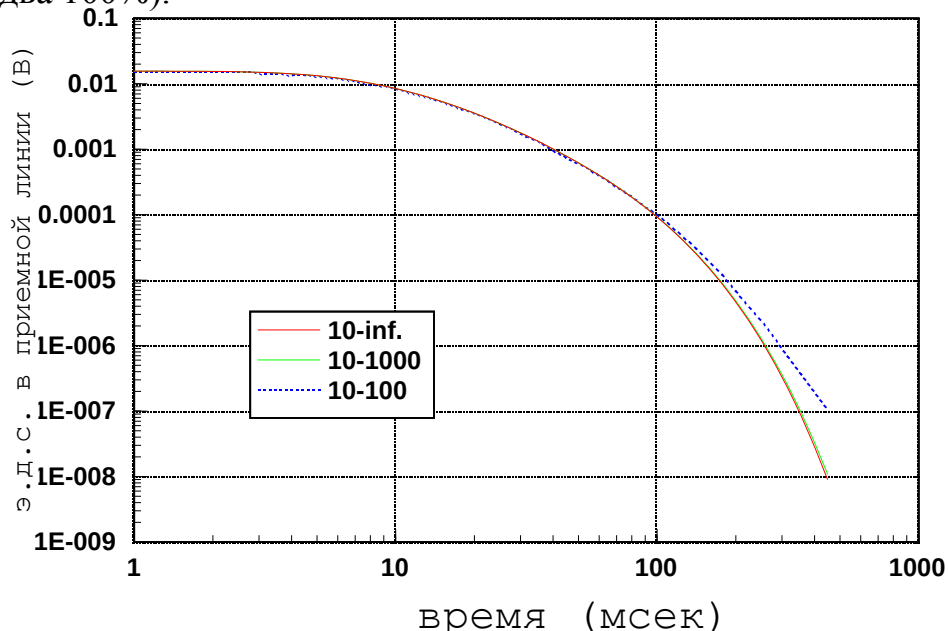


Рис. 3.3. Становление поля КЭД в двухслойной среде. Шифр кривых сопротивления первого слоя и основания (в Ом*м)

Еще один пример показывает радикальное отличие свойств процесса установления ТМ-типа от обычного становления. В описанный выше вмещающий разрез (основание изолирующее) мы помещаем поочередно проводящие горизонты (по 100 См) в основание слоя и в его середину. Сравниваем также эти сигналы (нормированные на “нормальный” процесс) с процессом в случае присутствия обеих, нижнего и верхнего горизонтов. В первой стадии процесса совпадают кривые “S-0” и “S-S” (горизонт вверху и два горизонта, рис. 3.5), что кажется естественным. Но в поздней стадии совпадают уже кривые “0-S” и “S-S”, а влияние верхнего горизонта практически отсутствует. Т.е. можно сказать, что известная “S-эквивалентность” недействительна в случае ТМ-процесса установления. Другими словами, это проявление того факта, что поздняя стадия процесса

установления поля электрического типа отнюдь не определяется суммарной продольной проводимостью.

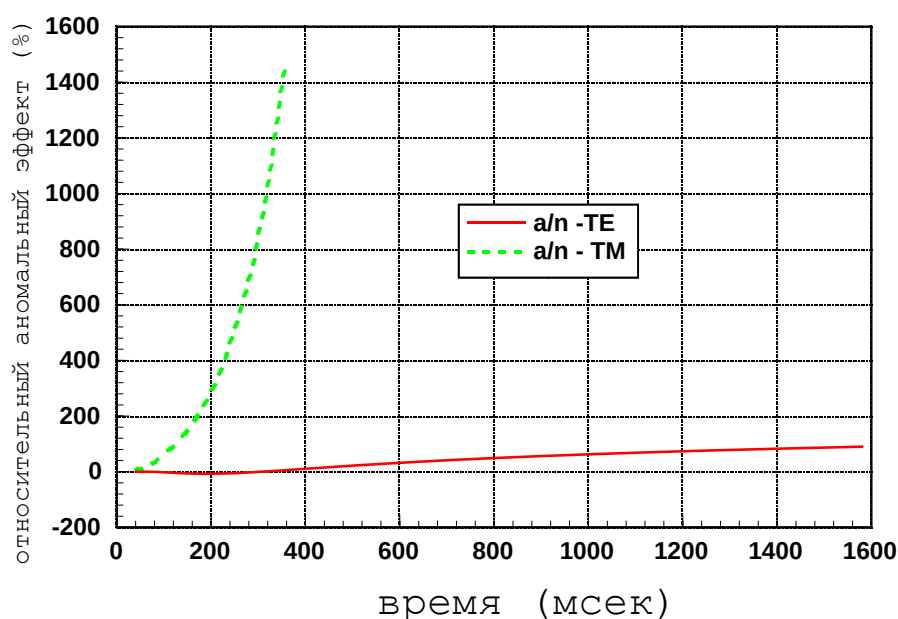


Рис.3.4. Сравнение аномальных эффектов от тонкого проводящего слоя в случае применения установки “петля-петля” и КЭД-MN.

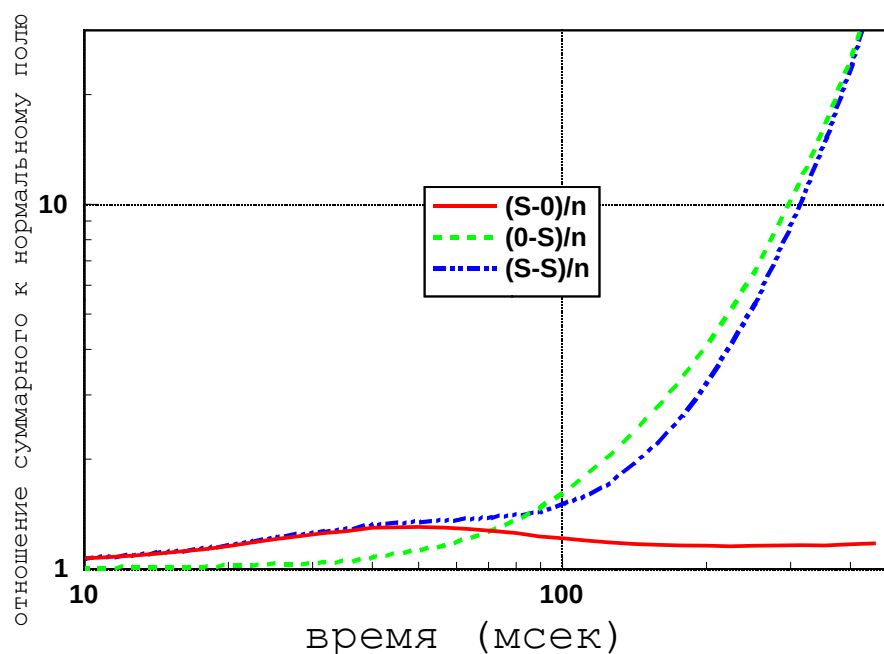


Рис.3.5. Суммарные отклики от среды, содержащей 1 (верхний или нижний) или 2 проводящих горизонта. Суммарные отклики нормированы на нормальное поле (без объектов).

Применение нестационарных зондирований с использованием поля чисто электрического типа имеет интересные перспективы и уже сейчас – интересные полевые результаты, но также и некоторые проблемы. Одна проблема унаследована от методов постоянного тока, которые, как мы уже констатировали, реализуют постоянное Е-поле. Это проблема изолирующих экранов, которая значительно стимулировала появление индуктивного метода. При индукционных зондированиях на переменном ТМ-поле проникновение токов и магнитного поля за экран все же происходит в поздней стадии, если сопротивление экрана не совсем велико.

Рассмотрим модель среды, первый слой которой (2000 м, $\rho = 10 \text{ Ом*м}$) отделен от основания тонким экраном (5 м, $\rho = 10000 \text{ Ом*м}$). Установка та же, что использовалась в приведенных выше примерах. Сопротивление основания меняем от 0.1 до 100 Ом*м. Несмотря на наличие экрана (весьма существенного) мы наблюдаем (рис. 3.6) зависимость наблюдаемого на дневной поверхности поля от проводимости основания.

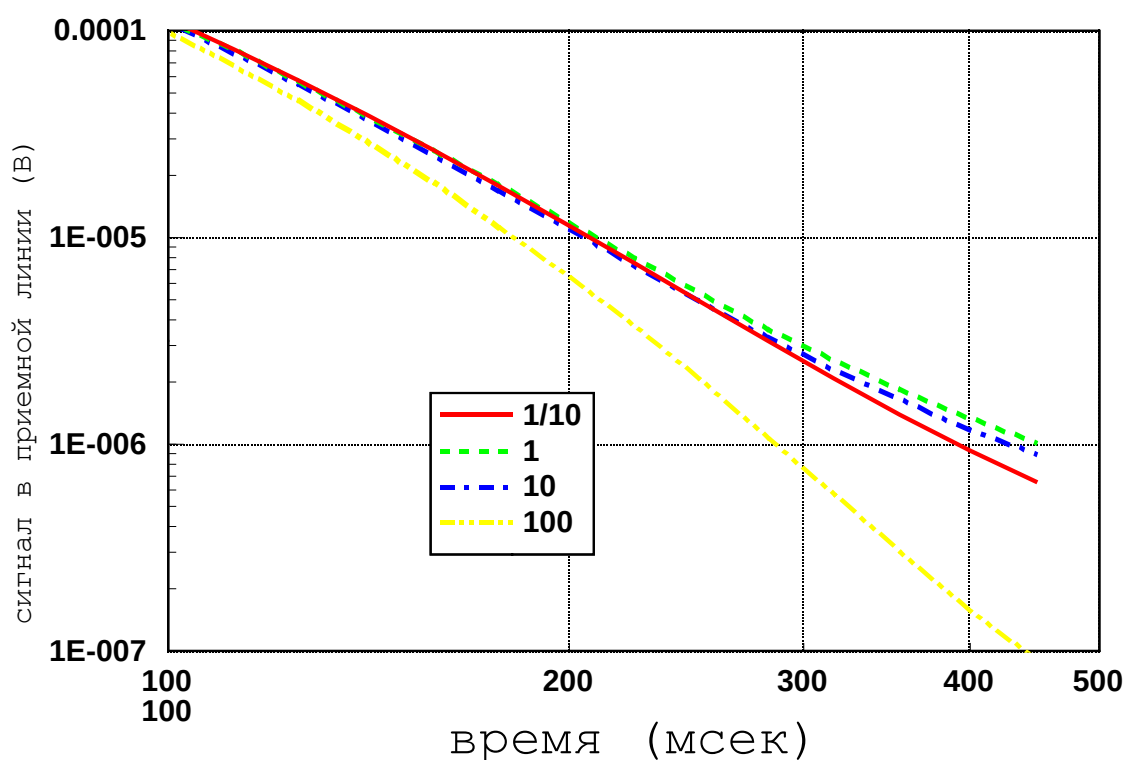


Рис.3.6. Влияние плохопроводящего экрана.

Все эти примеры показывают перспективность использования источника КЭД для изучения одномерного разреза. Плюс к этому при проведении полевых площадных исследований стандартной методикой ЗВТ-М, используя измерения радиальной электрической компоненты, мы сможем получить одномерный разрез, который соответствует нашей конфигурации возбужденных в среде токов, и этот разрез будет более правилен при дальнейшем конечном моделировании для получения геоэлектрического строения участка работ по данным метода ЗВТ.

3.2 Влияние конфигурации источника и приемника на измеряемый электрический сигнал в установке КЭД-MN

В процессе интерпретации результатов необходимо учитывать конфигурацию источника, особенно если мы проводим измерения вблизи него, необходимо отслеживать взаимное расположение приемника и источника, поскольку это может значительно повлиять на получаемый сигнал.

В данном подразделе изучается влияние расположения измерительной линии относительно реального КЭД. А именно, насколько влияет угол расположения линии MN между лучами КЭД на сигнал и насколько сильно влияет на сигнал отклонение линии MN от радиального направления, разнос линии MN и КЭД и также длина самой линии MN.

На основе результатов этого подраздела будут даны рекомендации по расположению измерительной линии относительно установки при полевых работах.

Учитывая эти факторы, было проведено математическое моделирование радиальных электрических сигналов от установки КЭД для того, чтобы определить насколько сильно могут повлиять различные параметры эксперимента на сигнал, и насколько информативным будет результат при изучении геоэлектрических свойств среды.

Для моделирования использовались расчетные процедуры, которые созданы в лаборатории электромагнитных полей и в лаборатории наземной геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН Антоновым Е.Ю. и Могилатовым В.С.

Расчеты проводились для 4-х типов трехслойных моделей с разной толщиной первого слоя от 200 метров до 1000 метров. Второй слой имел толщину 100 метров. Сопротивления слоев для каждого типа модели приведены ниже:

- 1) 1 слой - $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, 2 слой - $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, 3 слой - $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

- 2) 1 слой - 1 ом*м, 2 слой - 100 Ом*м, 3 слой - 1 Ом*м;
- 3) 1 слой - 1 ом*м, 2 слой - 1 Ом*м, 3 слой - 1 Ом*м;
- 4) 1 слой - 100 ом*м, 2 слой - 100 Ом*м, 3 слой - 100 Ом*м.

Данные модели сред были выбраны для того, чтобы понять, как будет вести себя ТМ-поле, а именно его радиальная электрическая составляющая, в некоторых типичных ситуациях: тонкий проводящий слой в полупространстве с высоким сопротивлением, плохо проводящий слой в полупространстве с низким сопротивлением, полупространство с низким сопротивлением и полупространство с высоким сопротивлением.

Выбор данных моделей на данном этапе не подразумевает какого-либо геологического соответствия реальности, в данном случае были выбраны некие асимптотические модельные ситуации, которые смогут показать потенциал установки. Исследование возможностей установки применительно к реальным средам в реальных регионах есть следующий этап исследований, в том случае если результат моделирования на асимптотических моделях будет положителен.

Для КЭД радиус составлял 500 метров. Разнос измерительной линии от центра КЭД был 1500 метров. Длина линии MN составляла 500 метров. Ток в сумме во всех лучах 64 ампера.

Моделирование должно было ответить на следующие вопросы:

1) понять, насколько реальную 8-ми лучевую конфигурацию КЭД можно считать источником именно ТМ-поля при измерении радиальной электрической компоненты;

2) насколько сильно будет изменяться сигнал в линии MN при различном ее геометрическом расположении относительно КЭД и при изменении длины линии MN, выработать критерии по расположению линии MN при проведении полевых работ.

3.2.1 Сравнение электрических сигналов от идеальной и реальной установки КЭД

В этой части работы приводятся результаты моделирования сигналов от реальной восьмилучевой установки КЭД, в сравнении с идеальным КЭД, который имеет равномерное угловое распределение тока. Идеальное равномерное угловое распределение тока есть идеальный источник ТМ-поля. Цель нашего моделирования состоит в том, чтобы понять насколько реальный 8-ми лучевой источник можно считать идеальным источником ТМ-поля.

Для решения поставленной задачи было проведено моделирование сигналов от реальной и идеальной установки. Моделирование проводилось для всех четырех моделей сред. Параметры генераторно-измерительного комплекса описаны в начале данной главы.

Результаты моделирования были близки для всех типов моделей. График относительных изменений для модели 2 приведен на рисунке 3.7.

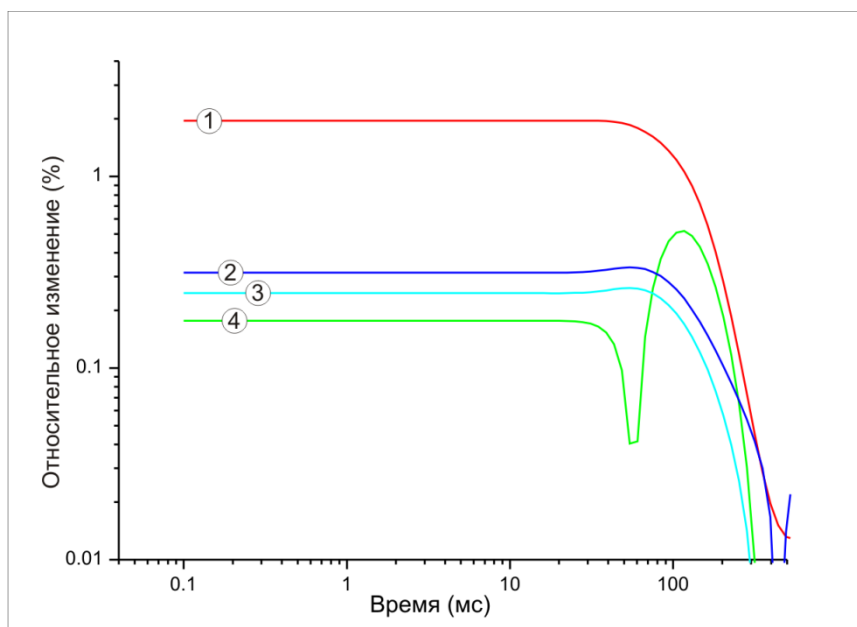


Рис. 3.7 Относительные изменения в сигнале для идеальной и реальной установки КЭД-MN: относительные изменения для линии MN равной: 1–400м, 2–600м, 3–800м, 4–1000м;

Из приведенного графика видно, что изменения в сигналах для случая идеального 8-ми лучевого источника малы и составляют около 2 % , и КЭД можно считать источником ТМ-поля.

Таким образом, можно считать, что реальный 8-ми лучевой источник КЭД при измерении радиальной электрической составляющей ведет себя как идеальный источник ТМ-поля, свойства которого мы и хотим изучать в дальнейшем.

3.2.2 Влияние на измеряемый сигнал разноса приемной линии MN и КЭД

Определение влияния разноса на получаемый сигнал есть важная задача, поскольку при проведении полевых измерений разнос может меняться в широком диапазоне от десятков метров до километров и если существует влияние данного параметра на сигнал, то это влияние необходимо учитывать в процессе интерпретации.

При проведении моделирования была взята двухслойная модель среды с изолирующим основанием и различным сопротивлением первого слоя (1, 10, 100 Ом*м). Толщина верхнего слоя составила 4000 метров. Данная модель была выбрана как наиболее простая, но были выбраны три различных сопротивления верхнего слоя, каждое из которых характеризует одну из типичных ситуаций: хорошо проводящая среда, плохо проводящая среда и некоторое среднее значение сопротивления.

Длина линии MN составила 200 метров, а расстояние от края КЭД до центра линии MN менялось от 100 до 2500 метров.

На рисунках 3.8-3.10 показаны сигналы, которые получены в результате моделирования для различных сопротивлений верхнего слоя (1, 10, 100 Ом*м). Четко видно, что с увеличением разноса, так момент начала спада уровня сигнала с начальных времен уходит в более позднюю область.

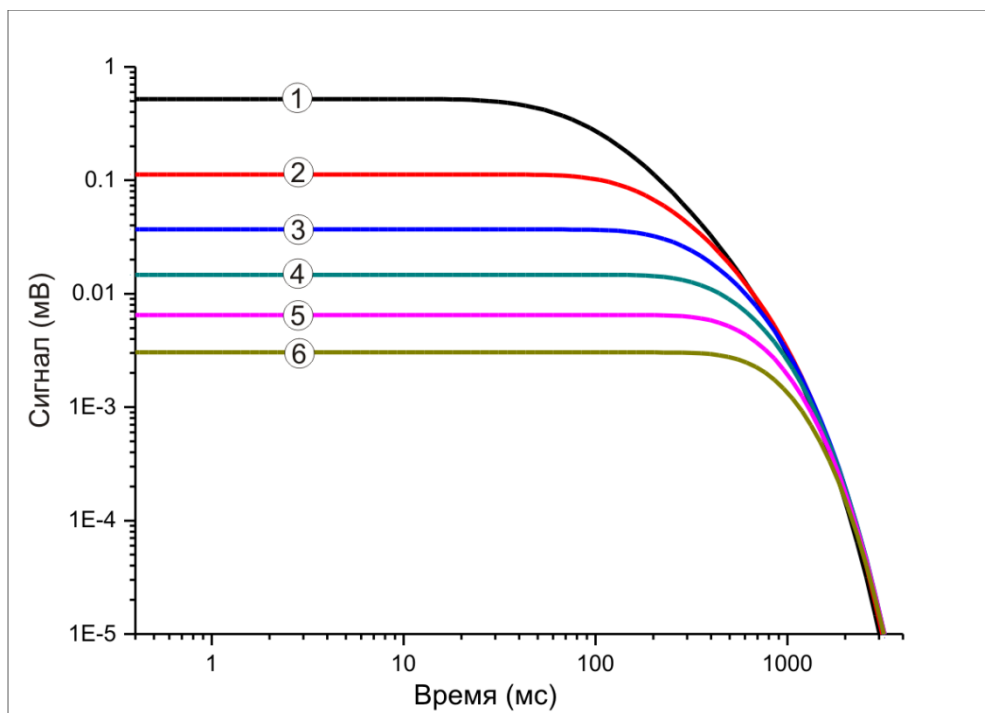


Рис. 3.8. Измеряемые сигналы в линии MN при изменении разноса от 500 до 2500 метров при сопротивлении верхнего слоя 1 Ом*м: 1–500м, 2–900м, 3–1300м, 4–1700м, 5–2100м, 6–2500м.

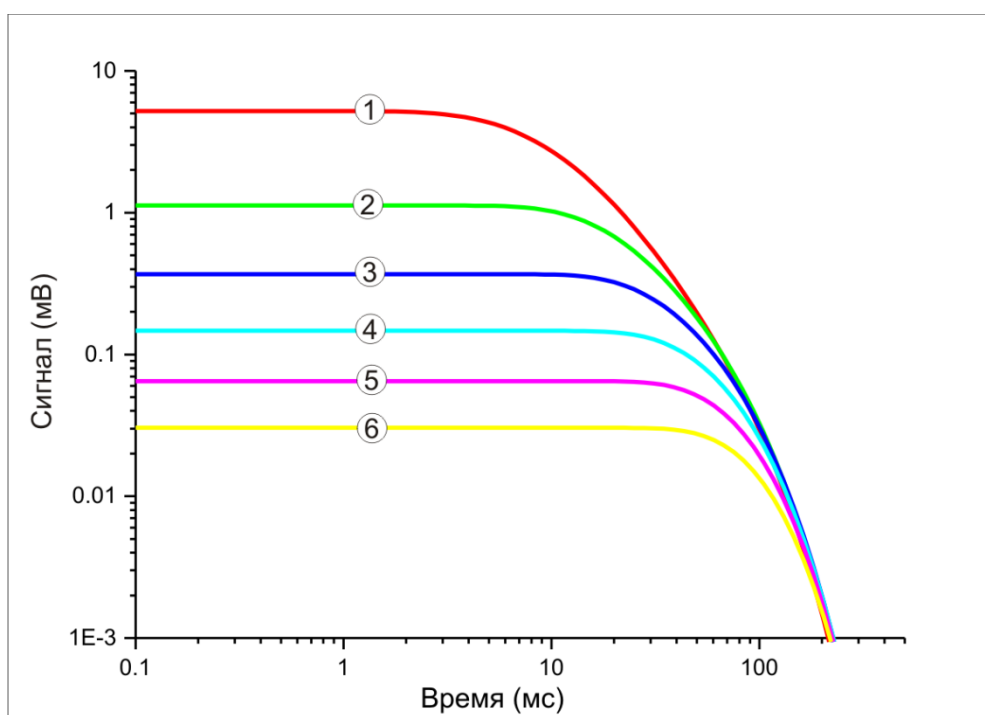


Рис. 3.9. Измеряемые сигналы в линии MN при изменении разноса от 500 до 2500 метров при сопротивлении верхнего слоя 10 Ом*м: 1–500м, 2–900м, 3–1300м, 4–1700м, 5–2100м, 6–2500м.

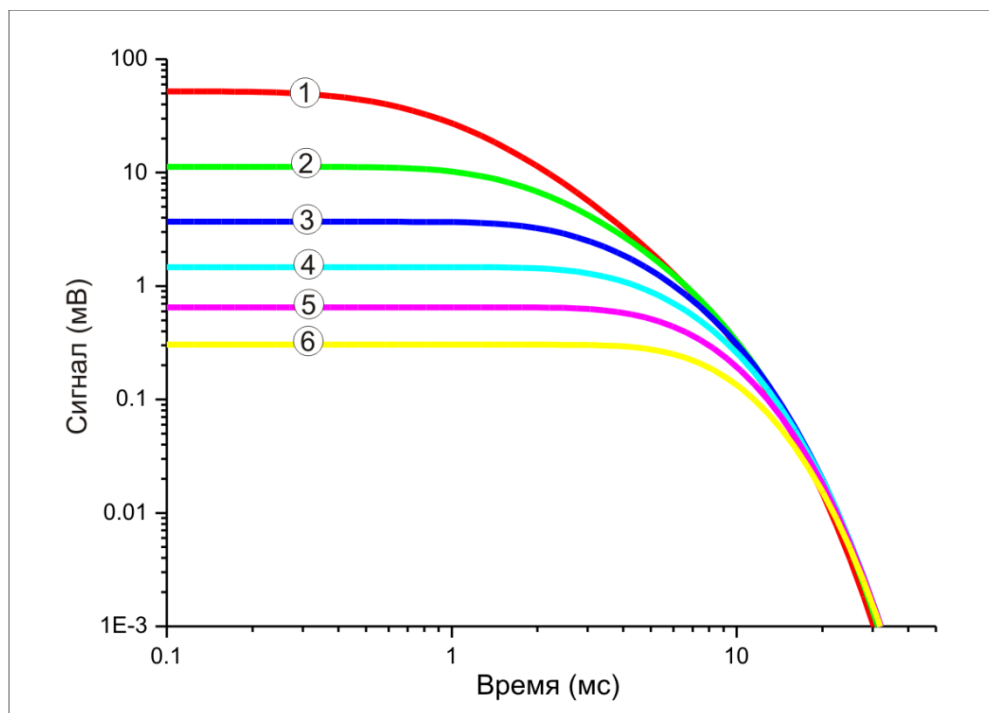


Рис. 3.10. Измеряемые сигналы в линии MN при изменении разноса от 500 до 2500 метров при сопротивлении верхнего слоя 100 Ом*м: 1–500м, 2–900м, 3–1300м, 4–1700м, 5–2100м, 6–2500м.

Время, на котором начинается спад, показывает момент, когда сигнал о выключении источника доходит до точки измерения. При проведении измерений, в которых в качестве источника выступает петля, такой эффект тоже существует, но он гораздо менее длительный и слабо меняется от разноса, поскольку сигнал посредством магнитного поля практически сразу доходит до точки измерения и практически не зависит от разноса.

В данном случае мы видим совершенно другую картину. Сигнал о выключении источника доходит до точки измерения только через среду, и время распространения сигнала сильно зависит от удаленности от точки измерения. На рисунке видно, что это время меняется 1 мс до 100 мс. Подобная ситуация имеет место быть и при других сопротивлениях верхнего слоя.

Зная, за какое время сигнал доходит до точки измерения можно определить зависимость скорости распространения сигнала в среде от

сопротивления. Из соображений размерности, зависимость времени прихода в точку измерения от расстояний и сопротивления среды должна выглядеть следующим образом:

$$r = \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{k \cdot \mu_0}} \quad (3.4)$$

Определение безразмерного коэффициента k можно сделать, основываясь как раз на результатах моделирования сигнала для различных разнесов точки измерения.

Как видно из рисунка 3.11 коэффициент, который входит в зависимость времени прихода сигнала в точку наблюдения в зависимости от расстояния до этой точки является с хорошей точностью одним и тем же для различных сопротивлений среды и времен измерений и равняется 0.025. Таким образом, определена зависимость времени распространения сигнала до точки измерения:

$$r = \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{0.025 \cdot \mu_0}}, \quad (3.5)$$

где r – расстояние от центра КЭД до точки измерения, t – время прихода сигнала, ρ – сопротивление верхнего слоя, μ_0 – магнитная проницаемость.

Выявление подобной зависимости, как видно из рис. 3.8-3.10., может сильно изменить сигнал. Соответственно, при проведении измерений и интерпретации данных радиальной электрической составляющей поля, необходимо учитывать и то, что в точки с различным разнесом основной сигнал становления приходит в различное время.

Кроме того, знание зависимости распространения сигнала становления до точки измерения даст возможность учесть это и при обработке площадных данных магнитного поля. В дальнейшем исследование данного фактора может дать более точную привязку по глубине как при измерении магнитной так и при измерении электрической составляющей поля.

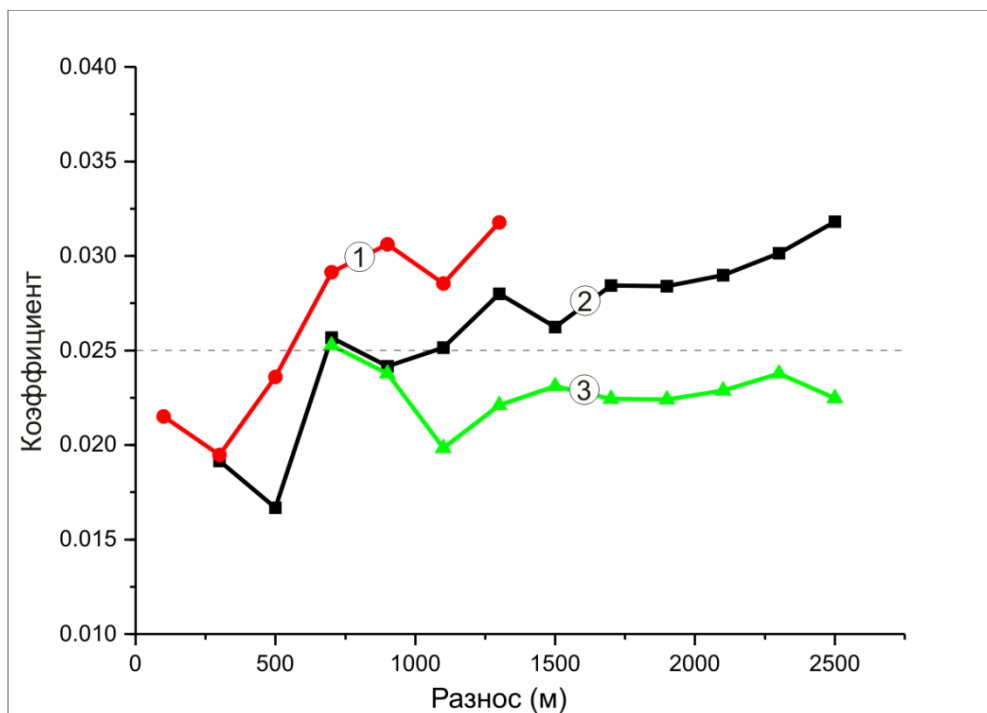


Рис. 3.11. Зависимость коэффициента k от разноса для различных сопротивлений среды: 1—1 Ом*м, 2—10 Ом*м, 3—100 Ом*м.

3.2.3 Влияние длины приемной линии MN на измеряемый сигнал

Для определения влияния на изменения в сигнале длины измерительной линии изучалось также относительное изменение сигнала. Базовым сигналом стал сигнал при длине измерительной линии 100 метров.

При проведении моделирования разнос между центром линии MN и центром КЭД оставался постоянным и равнялся 1500 метров. Длина линии менялась от 100 до 1800 метров. Моделирование проводилось для четырех моделей сред, которые описаны в начале главы.

Поскольку сигнал при одинаковом разноте центра измерительной линии и увеличении ее длины увеличивается, то при построении относительных изменений сигналы предварительно нормировались на одну амплитуду. Таким образом, получается относительное изменение в процентах именно формы сигнала, не зависящее от величины этого самого сигнала в линии MN.

Как видно из рисунка 3.12 (относительное изменение сигнала для модели 1) при увеличении длины линии MN уже до 400 метров отклонения в сигнале уже составляют около 10 процентов на большинстве промежутков времен измерения, что не укладывается в допустимую погрешность при проведении полевых электроразведочных работ. При увеличении длины относительное изменение увеличивается и достигает величины 100 процентов. На ранних же временах примерно до 0.1 мс относительные изменения для всех разносов достаточно малы и не сильно влияют на изменение сигнала.

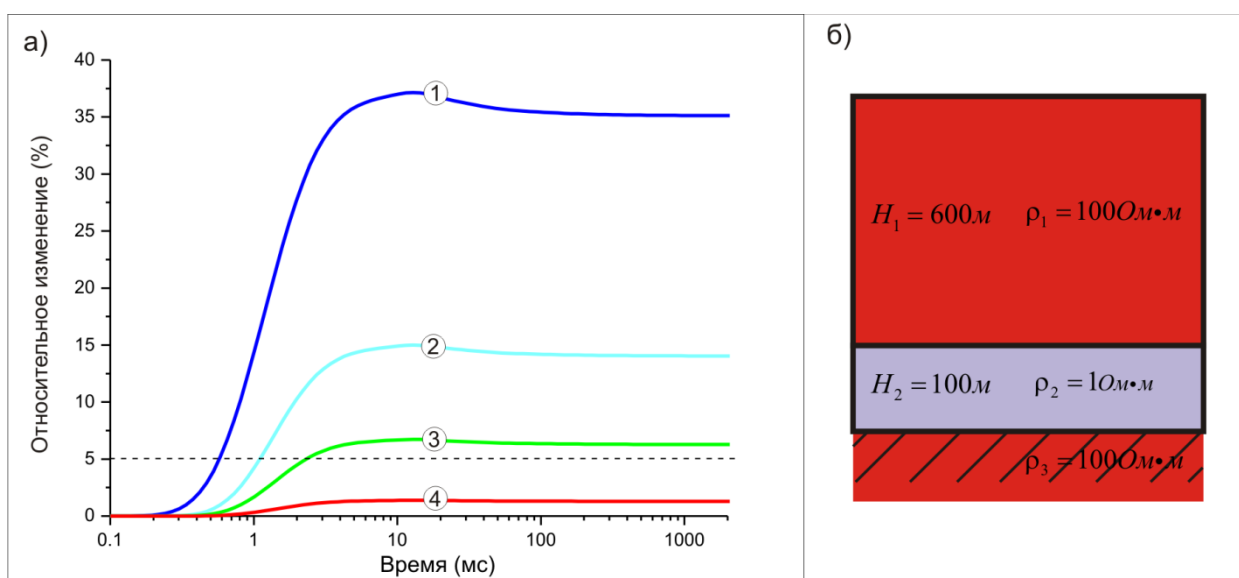


Рис. 3.12 Относительные изменения в сигнале при изменении длины линии MN для модели 1: а) относительные изменения для линии 1–1000м, 2–600м, 3–400м, 4– 200м; б) модель среды.

Изменение формы сигнала при увеличении длины вполне понятно, поскольку мы в итоговом сигнале получаем некий интегрированный сигнал между начальной и конечной точкой линии MN. Как было показано в предыдущем параграфе, форма сигнала сильно различается при различных разносах точки измерения, что связано с изменением времени прихода сигнала. В нашем случае, чем больше разнос, тем больше разница во времени прихода и тем выше относительные изменения сигнала.

Для модели 2 (рис. 3.13) картина относительного изменения сигнала в целом сохраняется такой же, как и для модели 1, с той лишь разницей, что время изменения сигнала, укладывающееся в допустимый интервал погрешности для всех разносов увеличилось и составило примерно 10 мс. Кроме того, видно, что при длине 400 метров на временах более 100 мс мы имеем отклонения около 10 процентов, что несколько больше чем для модели 1.

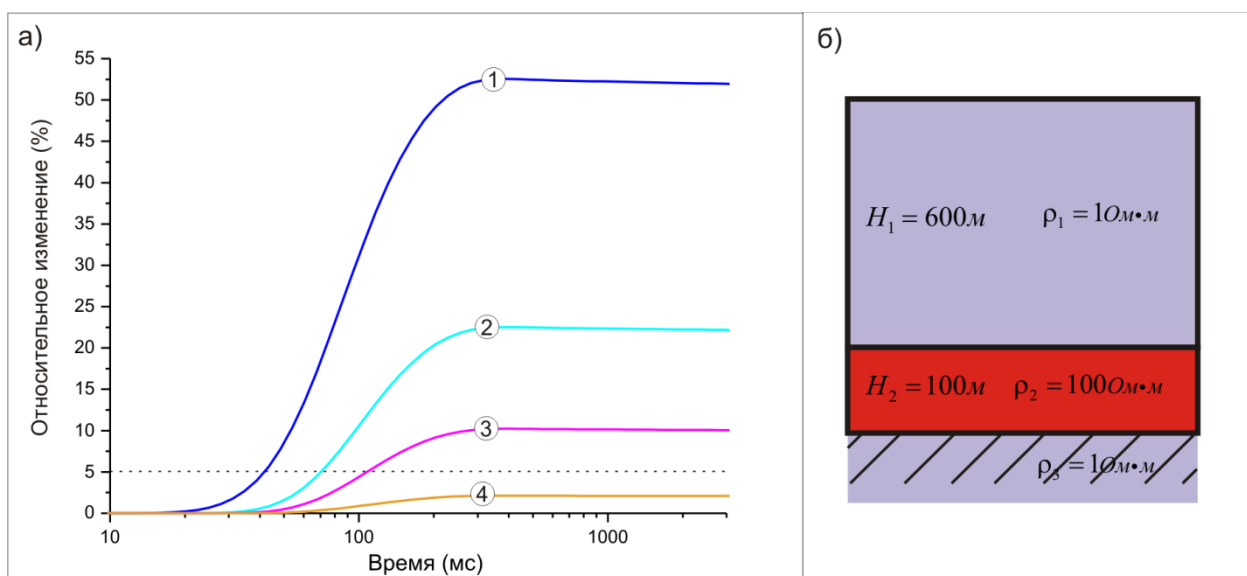


Рис. 3.13 Относительные изменения в сигнале при изменении длины линии MN для модели 2: а) относительные изменения для линии 1–1000м, 2–600м, 3–400м, 4– 200м; б) модель среды.

Для модели 3 (рис. 3.14) максимальное относительное изменение при разноте 400 метров составило примерно 8 процентов. Время же, для которого относительное изменение сигналов для всех длин измерительной линии MN оставалось в пределах 5 процентов, составило 10 мс.

Для модели 4 (рис. 3.15) картина наиболее похожа на ситуацию для модели 1 (см. рис. 3.12). Для длины 400 метров мы имеем максимальное относительное изменение порядка 8 процентов, и времена малого изменения для всех длин примерно 0.1 мс.

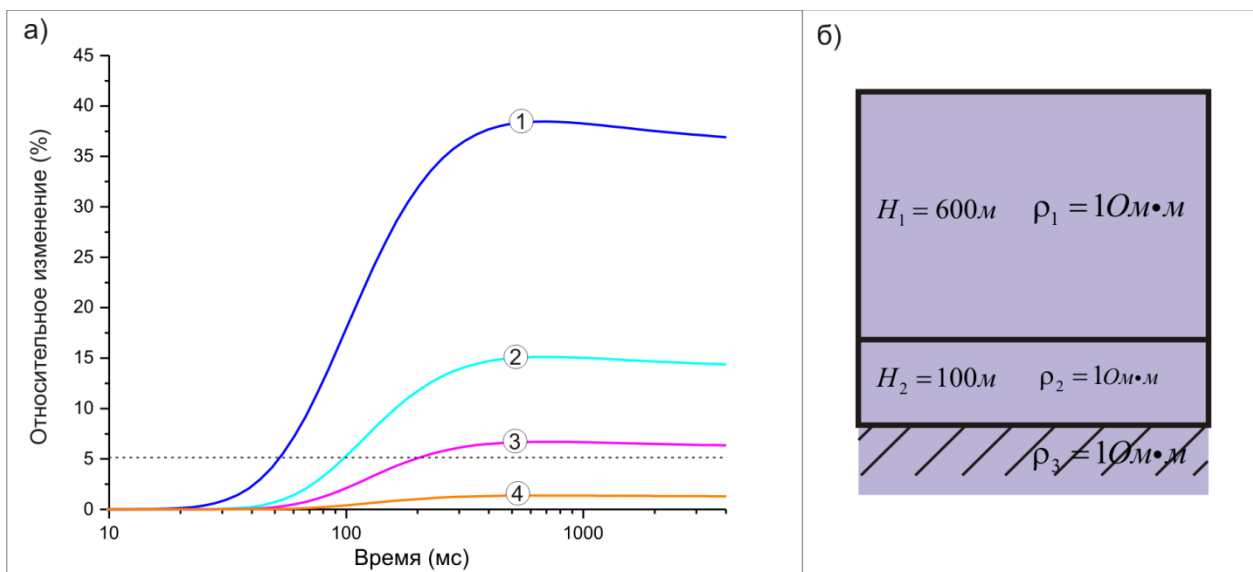


Рис. 3.14 Относительные изменения в сигнале при изменении длины линии MN для модели 3: а) относительные изменения для линии 1–1000м, 2–600м, 3–400м, 4– 200м; б) модель среды.

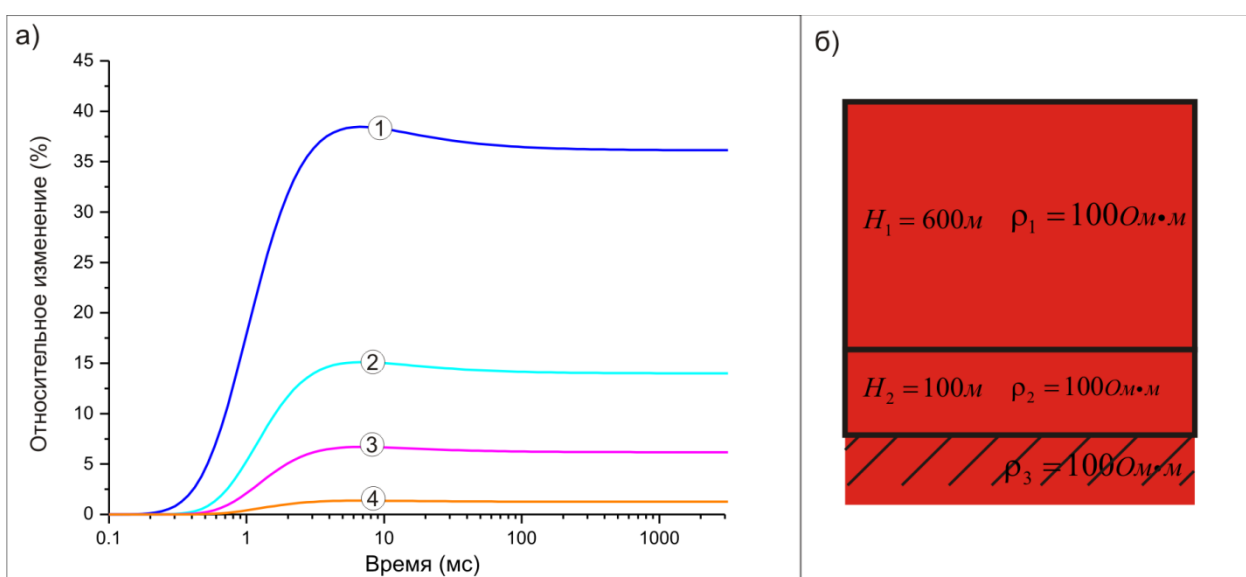


Рис. 3.15 Относительные изменения в сигнале при изменении длины линии MN для модели 4: а) относительные изменения для линии 1–1000м, 2–600м, 3–400м, 4– 200м; б) модель среды.

Из графиков относительного изменения сигнала при увеличении длины линии MN, которые приведены выше видно, что вплоть до длины линии 400 метров для всех моделей сред, которые были рассмотрены, относительные изменения укладываются в промежуток 5 процентов, что можно считать

удовлетворительным результатом при проведении полевых работ. То есть вплоть до длин 400 метров форму измеряемого сигнала можно считать неизменной, особенно если интересующий нас интервал это времена до 1 мс.

На предыдущих графиках показано относительное изменение нормированного сигнала, но также было бы полезным знать, насколько у нас будет увеличиваться сигнал по амплитуде при увеличении длины линии MN. На рис.3.16 показано изменение амплитуды при увеличении длины линии от 100 до 1800 метров для 4 моделей, которые мы рассматриваем. Видно, что увеличение амплитуды с длиной примерно одинаково для всех моделей сред и уже при разноре 400 метров составляет 400 процентов, то есть в 4 раза.

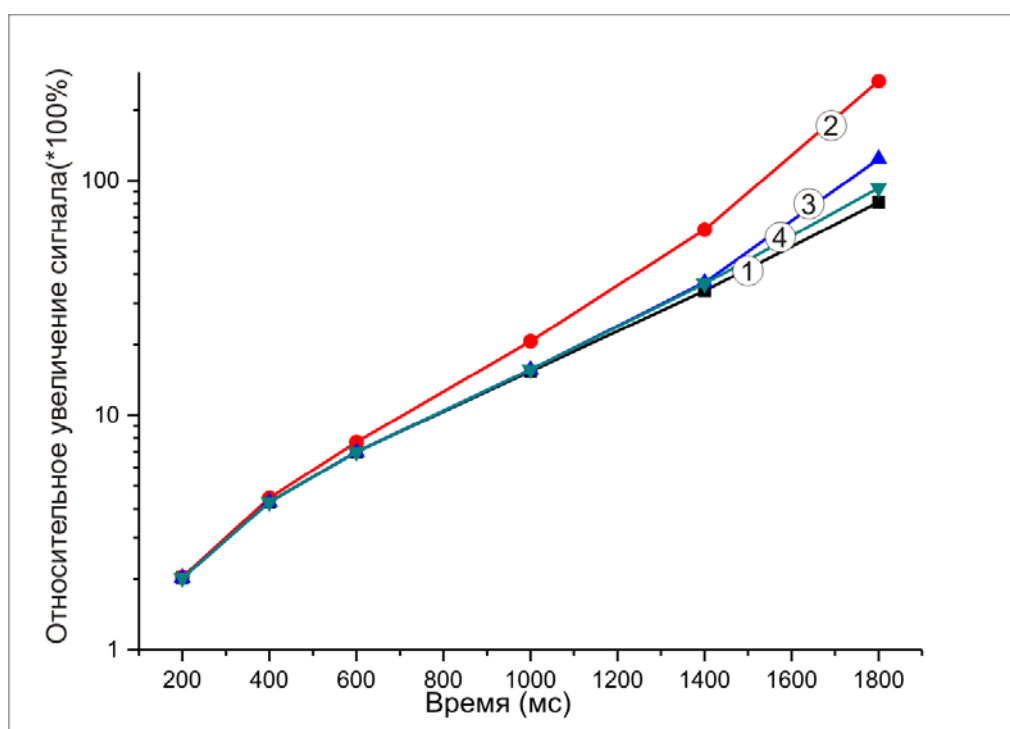


Рис. 3.16 Относительные изменения в сигнале при изменении длины линии для всех моделей при увеличении разноре: 1—модель с проводящим слоем, 2—модель со слабопроводящим слоем, 3—проводящее полупространство, 4—слабопроводящее полупространство.

Таким образом, на основе результатов данного параграфа можно сказать, что при увеличении длины линии MN вплоть до 400 метров, форма

сигнала будет мало меняться. Однако при увеличении длины линии MN мы можем получить выигрыш в 4 раза в амплитуде сигнала.

Показаны зависимости относительных изменений и зависимость амплитуды для различных моделей среды и длин линии MN, что позволит при проведении полевых работ выбирать параметры измерения, основываясь на полученных зависимостях, и увеличит качество полевых данных и упростит процесс их получения.

3.2.4 Влияние на измеряемый сигнал угла между ближайшим лучом установки и приемной линией, расположенной строго в радиальном направлении

Здесь приведены результаты изучения влияния на измеряемый сигнал отклонения линии MN от направления вдоль одного из лучей. Другими словами насколько изменится сигнал, если линию отклонить на некоторый угол относительно какого-либо луча, но сохранить ее радиальное направление. Схема численного эксперимента показана на рисунке 3.17.

Данное сравнение проводилось для всех типов моделей сред и для различных углов относительно выбранного луча $\varphi = 5, 10, 15, 20, 22,5^\circ$.

Относительное изменение сигналов вычислялось по формуле:

$$\eta = \left| \frac{(E_0 - E_\varphi)}{E_0} \right| \cdot 100\% \quad (3.6)$$

где η – относительное изменение, E_0 – значение сигнала при $\varphi = 0$, E_φ – значение сигнала при выбранном угле φ . Ниже приводятся результаты моделирования.

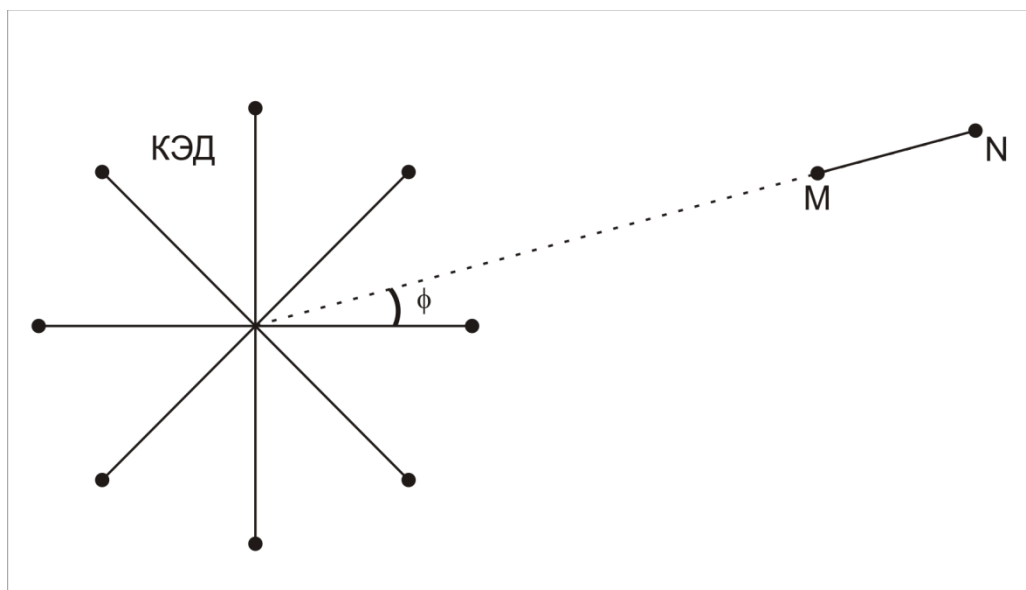


Рис. 3.17: Схема численного эксперимента: КЭД – круговой электрический диполь, MN – измерительная линия, ϕ – угол, влияние изменения которого исследуется.

На рисунке 3.18 приведены графики относительных изменений для всех значений мощности верхнего слоя при отклонении линии на 10 градусов для модели 1. При различных мощностях верхнего слоя влияние радиального угла незначительно, и не превышает 2%.

Также исследовалось относительное влияние разных углов при фиксированной толщине верхнего слоя (рис. 3.19). Из приведённого графика также видно, что относительное изменение возрастает при увеличении угла отклонения, что собственно и следовало ожидать, поскольку, располагая линию MN на линии луча, КЭД виден нам, как симметричная установка. Если же отклоняться от направления выбранного луча, то симметрия нарушается, и относительное изменение увеличивается.

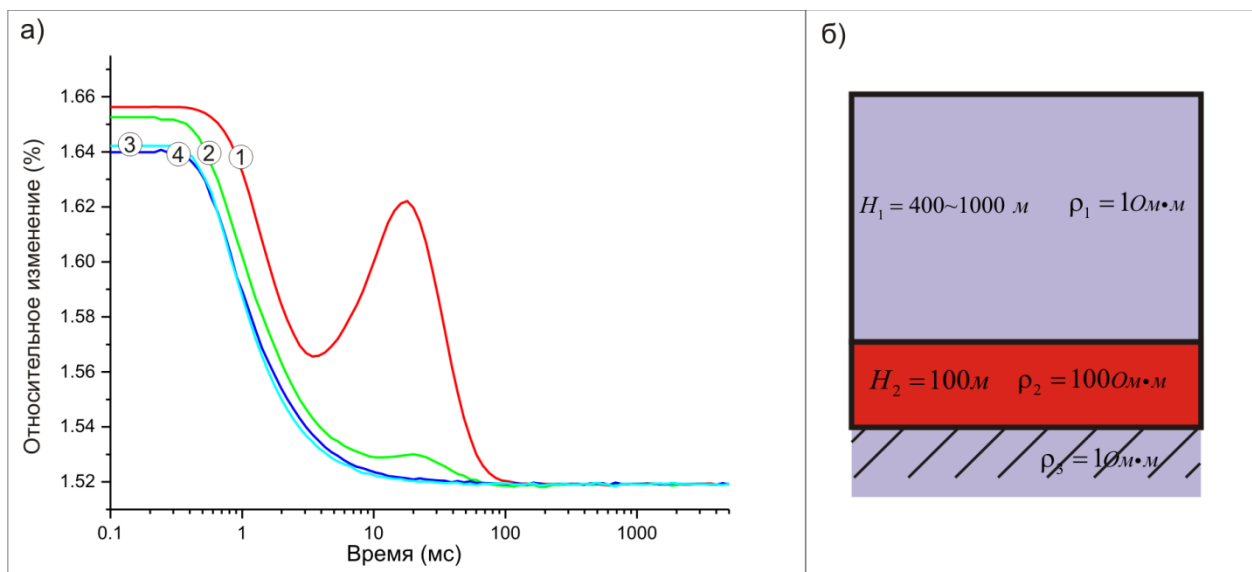


Рис. 3.18: Относительное изменение сигнала при отклонении линии MN на 10 градусов относительно одного из лучей КЭД для модели 1: а) относительные изменение сигнала при толщине верхнего слоя 1–400м, 2–600м, 3–800м, 4– 1000м; б) модель среды.

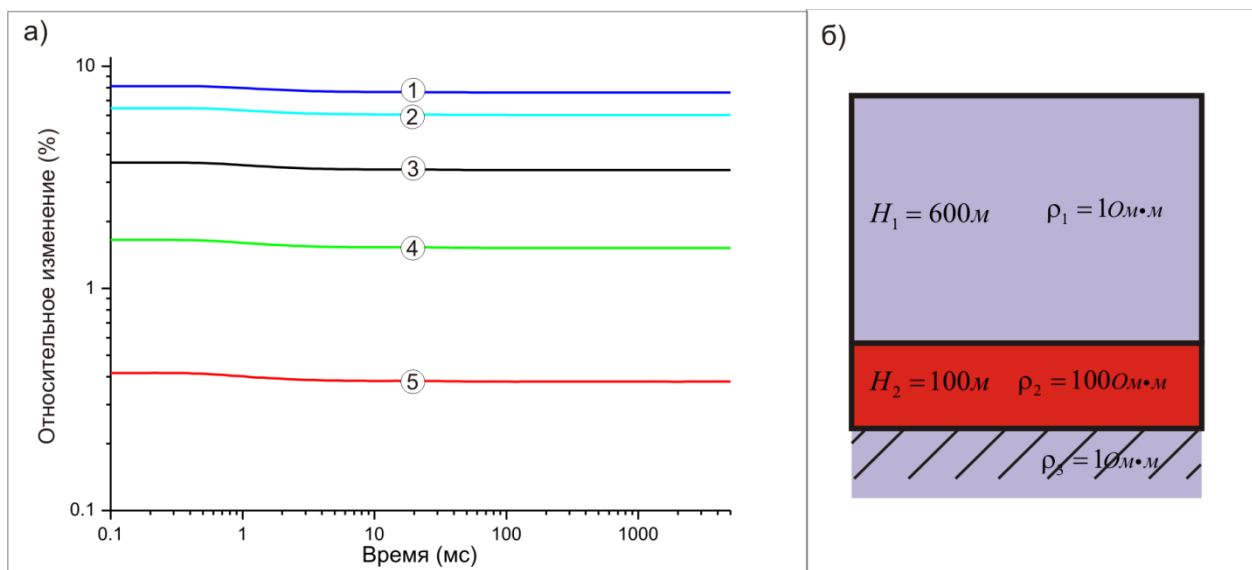


Рис. 3.19: Относительное изменение сигнала для различных углов φ относительно луча КЭД для модели 1 при толщине верхнего слоя 600 метров: а) относительные изменения для угла φ 1–22.5°, 2–20°, 3–15°, 4–10°, 5–5°; б) модель среды.

На рисунке 3.18 приведены графики относительных изменений для всех значений мощности верхнего слоя при отклонении линии на 10 градусов для модели 1. При различных мощностях верхнего слоя влияние радиального угла незначительно, и не превышает 2%.

Также исследовалось относительное влияние разных углов при фиксированной толщине верхнего слоя (рис. 3.19). Из приведённого графика также видно, что относительное изменение возрастает при увеличении угла отклонения, что собственно и следовало ожидать, поскольку, располагая линию MN на линии луча, КЭД виден нам, как симметричная установка. Если же отклоняться от направления выбранного луча, то симметрия нарушается, и относительное изменение увеличивается.

Тем не менее, относительные изменения сигнала при таких отклонениях не превышают 8%, что говорит о том, что влияние угла отклонения линии MN от направления какого-либо луча КЭД незначительно.

На рисунках 3.20-3.23 показаны результаты моделирования для других моделей. На всех рисунках видно, что для различных типов моделей и различных толщин верхнего слоя относительные изменения сигналов также незначительны и составляют величины менее 2%. С влиянием угла та же ситуация, что и в модели 1. Максимальные изменения составляют порядка 8%.

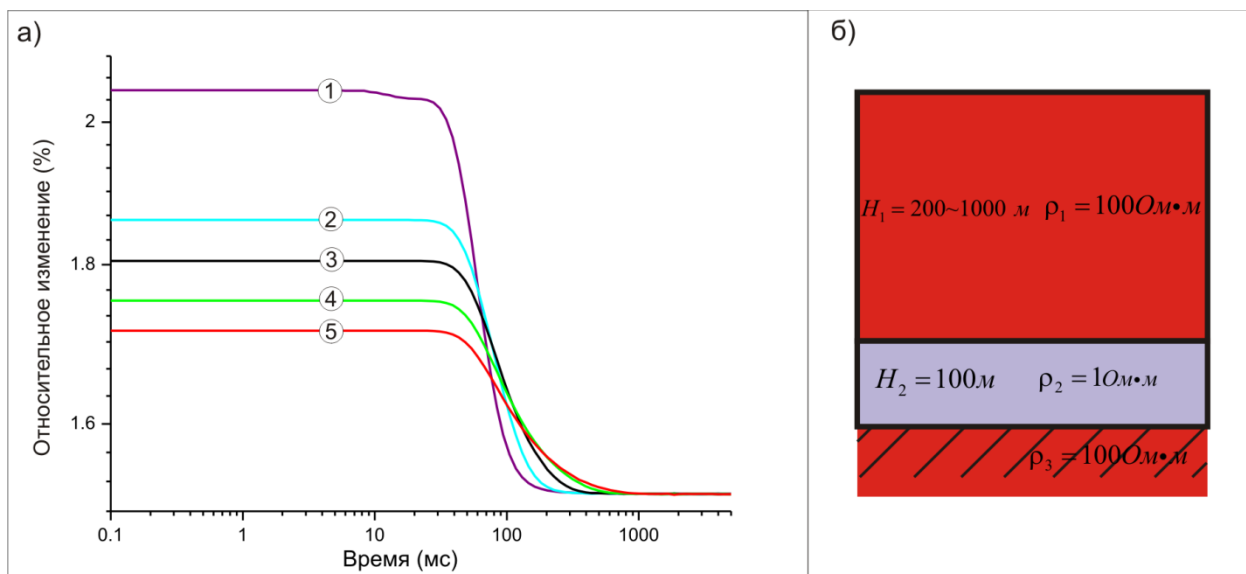


Рис. 3.20: Относительное изменение сигнала при отклонении линии MN на 10 градусов относительно одного из лучей КЭД для модели 2: а) относительные изменения сигнала при толщине верхнего слоя 1–400м, 2–600м, 3–800м, 4– 1000м; б) модель среды.

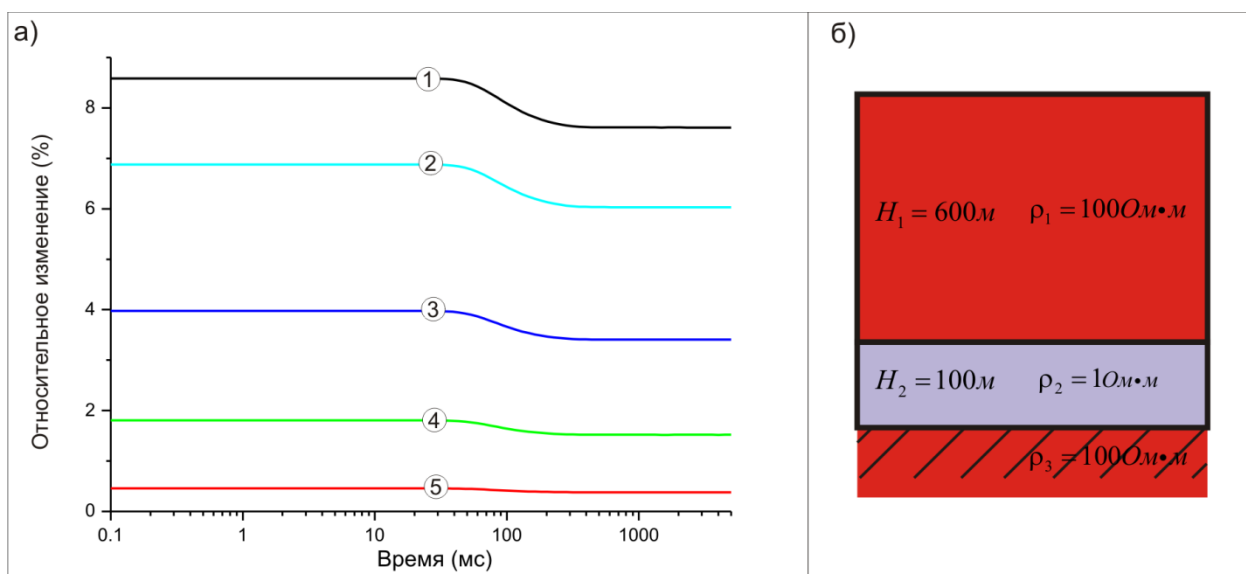


Рис. 3.21: Относительное изменение сигнала для различных углов φ относительно луча КЭД для модели 2 при толщине верхнего слоя 600 метров: а) относительные изменения для угла φ 1–22.5°, 2–20°, 3–15°, 4–10°, 5–5°; б) модель среды.

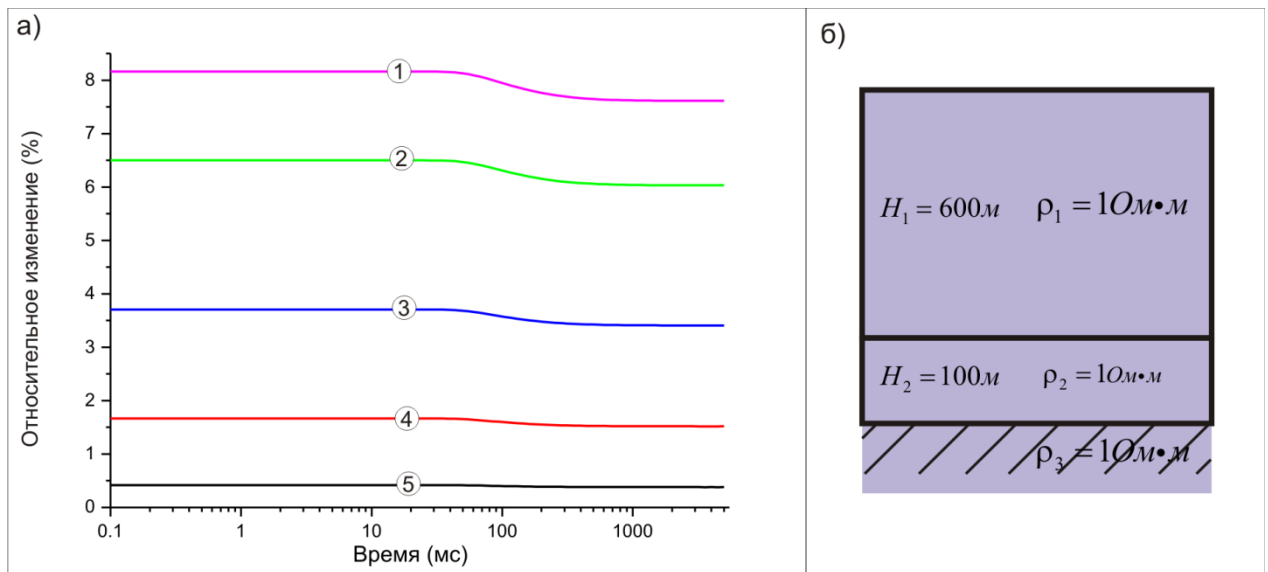


Рис. 3.22: Относительное изменение сигнала для различных углов φ относительно луча КЭД для модели 3 (проводящее полупространство): а) относительные изменения для угла φ 1–22.5°, 2–20°, 3–15°, 4–10°, 5–5°; б) модель среды.

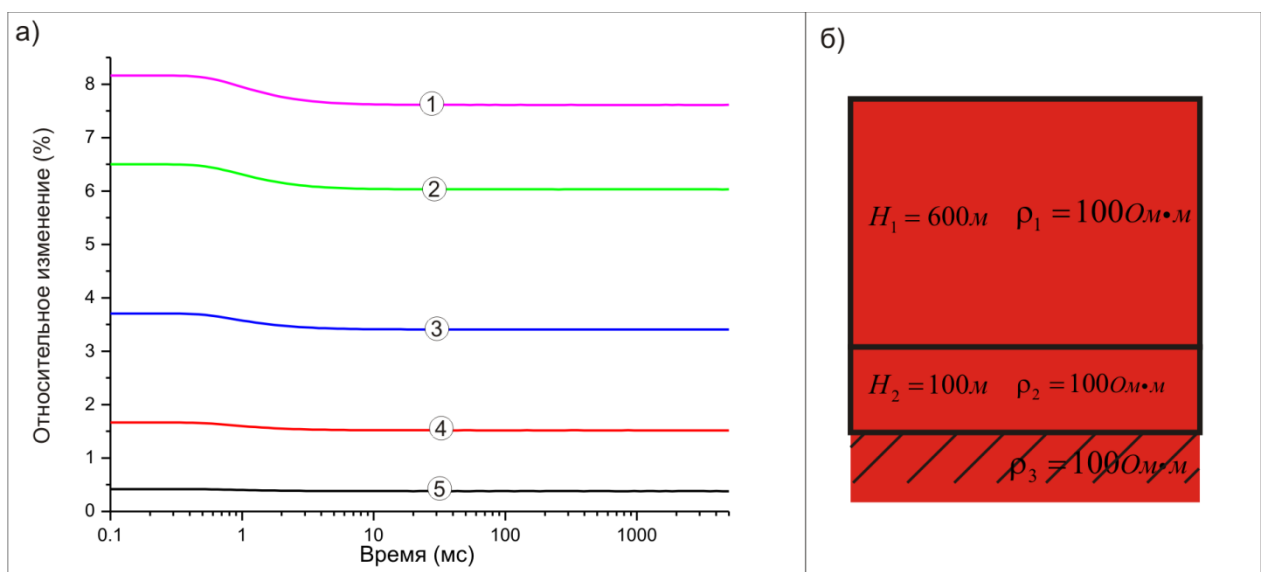


Рис. 3.23: Относительное изменение сигнала для различных углов φ относительно луча КЭД для модели 4 (слабопроводящее полупространство): а) относительные изменения для угла φ 1–22.5°, 2–20°, 3–15°, 4–10°, 5–5°; б) модель среды.

На рисунках 3.20-3.23 показаны результаты моделирования для других моделей. На всех рисунках видно, что для различных типов моделей и различных толщин верхнего слоя относительные изменения сигналов также незначительны и составляют величины менее 2%. С влиянием угла та же ситуация, что и в модели 1. Максимальные изменения составляют порядка 8%.

Из вышесказанного можно сделать заключение, что влияние радиального угла одинаково для различных моделей и оно невелико, в наших исследованиях не превысило 3%. Влияние же радиального угла линии MN для одной и той же модели более существенно, но все таки малозначительно и составляет максимум 8%, что укладывается в погрешность измерений при проведении электроразведочных работ. Соответственно можно сделать вывод о том, что угол между каким-либо лучом КЭД и радиальным направлением, вдоль которого расположена измерительная линия, не влияет существенно на результат, и при проведении полевых работ он может быть любым. Это существенно упрощает проведение полевых работ при закреплённом источнике КЭД и позволит опосредовать большие площади без изменения местоположения источника.

3.2.5 Влияние угла поворота приемной линии вокруг своей оси на измеряемый сигнал

В данной части работы проводилось моделирование с целью выявления влияния угла ψ (угол вращения приемника вокруг своей оси).

Было проведено сравнение для среды с параметрами модели 1 и мощностью верхнего слоя 600 м. При проведении моделирования были взяты значения угла ϕ (угол отклонения линии MN относительно какого-либо луча) 0, 15 и 22.5 градуса. Угол ψ принимал значения $\phi+3$, $\phi+6$, $\phi+10$, $\phi+20$, $\phi+30$ и т.д.

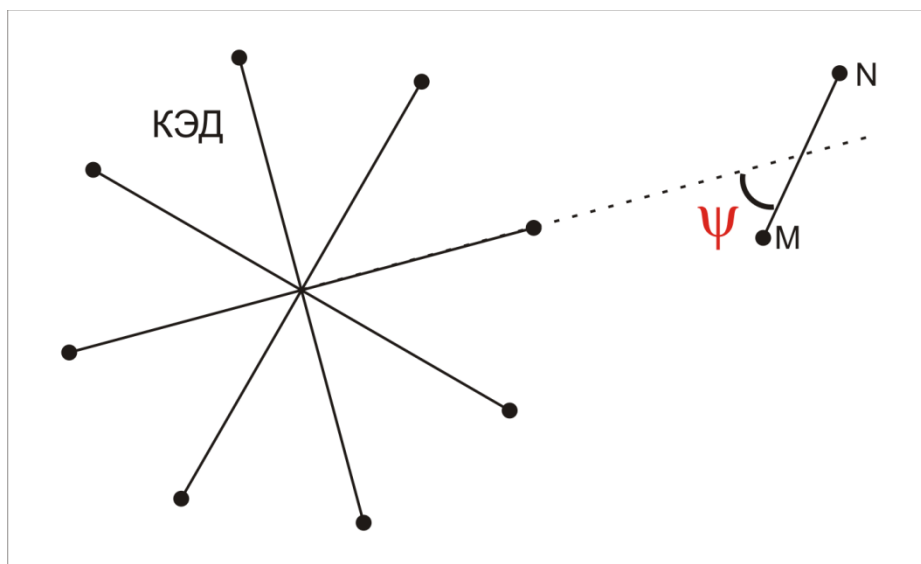


Рис. 3.24 Схема численного эксперимента: КЭД – круговой электрический диполь, MN – измерительная линия, Ψ – угол, влияние изменения которого исследуется.

Исследование показало, что для разных ~~функций~~ ~~функций~~ наблюдается примерно одинаковая зависимость относительной разницы сигналов от угла ψ . Точкой отсчёта в каждом случае принято положение приёмной линии $\psi = \varphi$.

Анализируя графики относительного изменения сигналов как для модели 1 (рис. 3.25-3.27), так и для других моделей, которые ведут себя аналогично можно сказать, что при вращении измерительной линии вокруг своей оси изменения могут составлять 100 процентов и выше. Поэтому при проведении полевых работ нужно контролировать радиальность расположения измерительной линии относительно установки КЭД и отклонение от радиального направления не должно превышать 5-10 градусов.

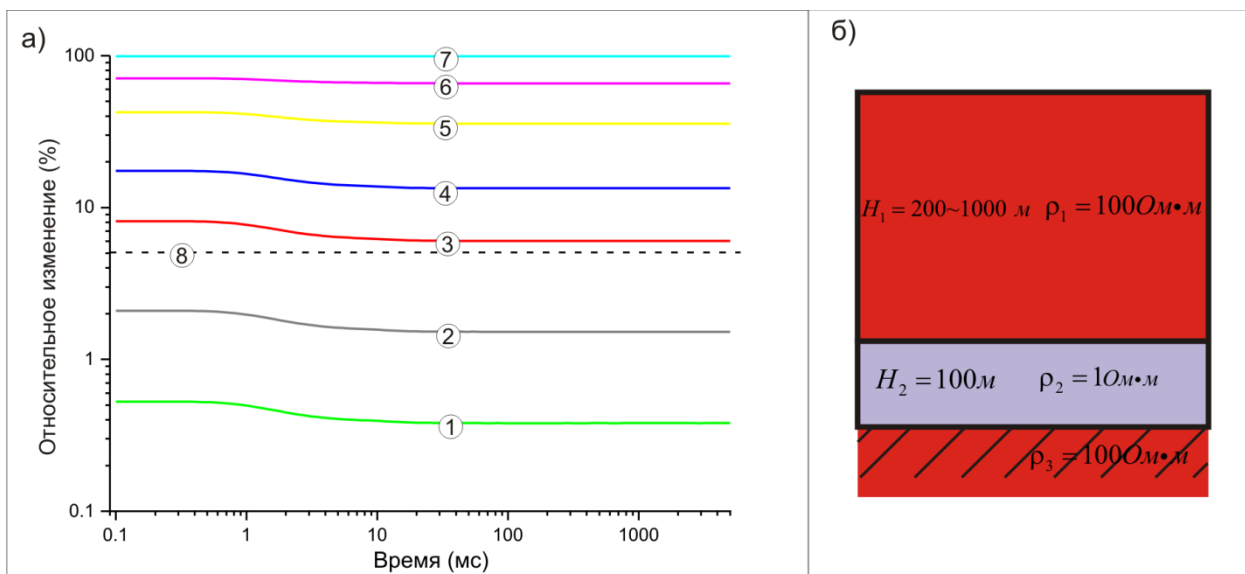


Рис. 3.25 Относительная разница сигналов при $\varphi = 0^\circ$ а) 1 – $\psi = \varphi + 6$, 2 – $\psi = \varphi + 10$, 3 – $\psi = \varphi + 20$, 4 – $\psi = \varphi + 30$, 5 – $\psi = \varphi + 40$, 6 – $\psi = \varphi + 40$, 7 – $\psi = \varphi + 60$, 8 – линия максимально допустимых отклонений 5%, б) модель среды.

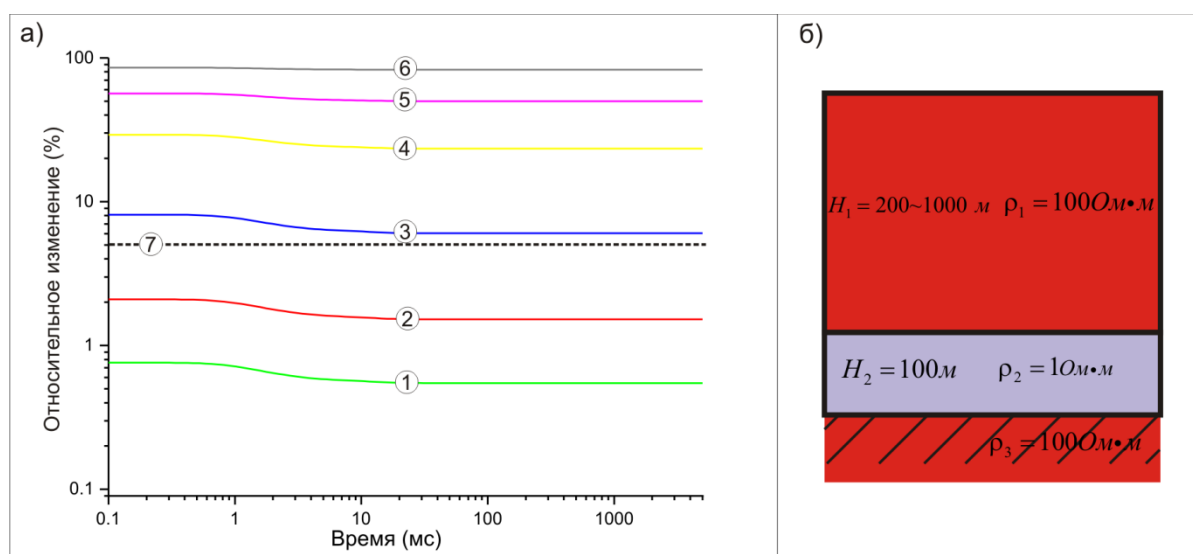


Рис. 3.26 Относительная разница сигналов при $\varphi = 15^\circ$ а) 1 – $\psi = \varphi + 6$, 2 – $\psi = \varphi + 10$, 3 – $\psi = \varphi + 20$, 4 – $\psi = \varphi + 40$, 5 – $\psi = \varphi + 40$, 6 – $\psi = \varphi + 60$, 7 – линия максимально допустимых отклонений 5%, б) модель среды.

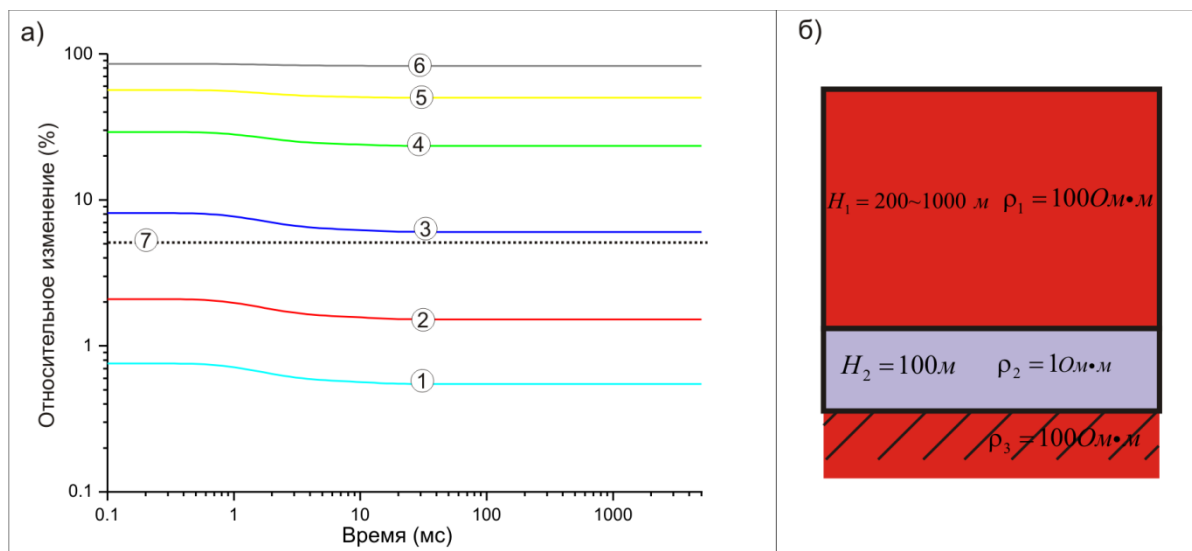


Рис. 3.27 Относительная разница сигналов при $\varphi = 22.5^\circ$ а) 1 – $\psi = \varphi + 6$, 2 – $\psi = \varphi + 10$, 3 – $\psi = \varphi + 20$, 4 – $\psi = \varphi + 40$, 5 – $\psi = \varphi + 40$, 6 – $\psi = \varphi + 60$, 7 – линия максимально допустимых отклонений 5%, б) модель среды.

3.2.6 Выводы

Основываясь, на приведенных выше результатах моделирования измеряемого сигнала в зависимости от различных параметров относительного местоположения установки КЭД и приемной линии MN можно дать конкретные рекомендации по проведению полевых работ для получения качественного результата.

При полевых измерениях необходимо четко выдерживать радиальное направление измерительной линии. Отклонение от радиального направления сильно искажает сигнал уже при малых углах превышающих 10 градусов.

С другой стороны, изменение угла измерительной линии, относительно какого либо из лучей при сохранении радиально направления, не дает значительных искажений в конечном сигнале. Это позволяет проводить полноценные площадные работы со стационарной установкой КЭД во всех направлениях.

При увеличении разноса между КЭД и измерительной линией видны изменения в сигнале, которые связаны с различным временем прихода основного сигнала становления в точку измерения. На основе результатов моделирования определена зависимость времени прихода основного сигнала в точку измерения в зависимости от разноса и сопротивления среды:

$$r = \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{0.025 \cdot \mu_0}}$$

Исследовано изменение сигнала при увеличении длины измерительной линии и постоянном разноре. Показано, что вплоть до длин 400 метров относительные изменения в сигнале малы. Также выявлена зависимость изменения амплитуды от длины измерительной линии. Знание этих зависимостей даст возможность при проведении работ более гибко и осознанно выбирать размер измерительной линии, что позволит получать более достоверные и качественные измерения.

3.3 Сравнение установок КЭД-MN и ABMN.

В современной практике полевых исследований в электроразведке используются различные установки, но принципиально отличными друг от друга можно назвать лишь КЭД и незаземленную петлю. Кроме того, к самым распространенным источникам можно отнести еще и линию АВ. При изучении процессов ВП, наиболее широко применяется заземленная линия АВ. Именно поэтому хотелось бы сравнить влияние на сигнал от КЭД и линии АВ различных параметров среды, таких как сопротивление и мощность слоев и также поляризационных параметров слоя. В дальнейшем, конечно, хотелось бы получить более полное сравнение, изучив также и такой источник как «петля», но это вопрос дальнейших исследований.

Задача данной части работы определить насколько возможности КЭД отличаются от установки ABMN в области измерения параметров ВП. Необходимо понять, какие есть плюсы и минусы использования КЭД в качестве источника. Также хотелось бы узнать, насколько чувствительны эти установки друг относительно друга при изменении сопротивления и глубины слоя.

Можно сказать, что традиционные источники гораздо менее трудоемко использовать в полевых измерениях, поскольку для них не требуется так четко соблюдать геометрию источника, как это требуется для КЭД. И с этой точки зрения КЭД является менее предпочтительным. Но если возможности КЭД при измерении параметров ВП будут сравнимы с возможностями традиционных источников, мы получим ряд преимуществ.

Основным преимуществом будет являться, конечно же, возможность площадных исследований со стационарно расположенным источником, что на порядок упрощает подобного рода полевые работы. Кроме того, можно будет работать одновременно несколькими измерительными отрядами независимо, что увеличит производительность в разы. Собственно мы

получим все те преимущества, которые имеются при использовании КЭД в измерениях вертикальной магнитной составляющей поля.

Использование КЭД в качестве источника возбуждения поля при измерении радиальной электрической компоненты даст нам технологически более совершенную установку. И задача настоящего раздела определить насколько будет эффективно или неэффективно использовать данную установку в различных геоэлектрических условиях с точки зрения информативности конечного результата.

3.3.1 Первый полевой эксперимент

Впервые электрический сигнал от установки КЭД наблюдался в поле в зимних условиях (январь 1993г.) в восточной части Западно-Сибирской плиты, в Каргатском районе Новосибирской области. В районе работ развита мощная толща осадочных отложений, характерная для всей Западно-Сибирской платформы. Обобщено, с позиции электрических свойств, состава и возраста, осадочные образования можно разделить на три комплекса: палеозойский - высокоомный, мезозойский – низкоомный и кайнозойский – повышенного сопротивления [40].

Работы проводились с восьмилучевой установкой (рис.3.28). Длина луча (радиус КЭД) 500м. Заземление каждого конца линии производилось железными кольями длиной 1м, по три штуки, на расстоянии 2-3 м между собой. Таким образом, центральное заземление образовалось 24 забитыми кольями, соединенными между собой.

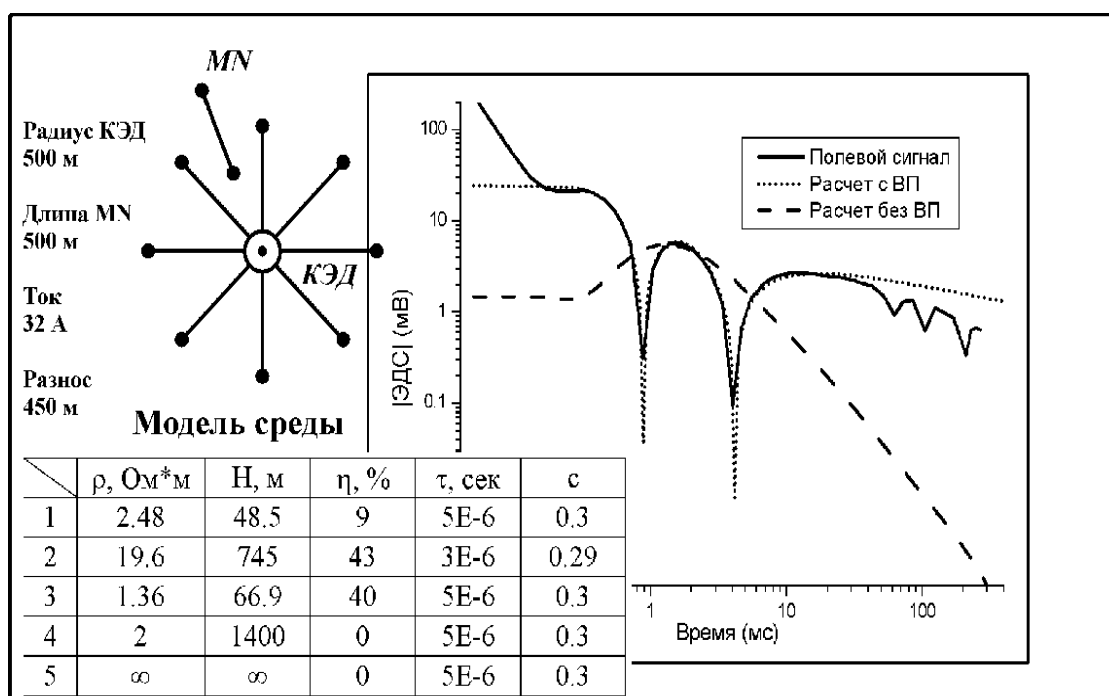


Рис.3.28 Схема установки, модель среды и полученные сигналы первого полевого эксперимента.

Линия MN располагалась радиально и симметрично относительно 7-го и 8-го лучей установки. Расстояние от центра установки до первого электрода линии составляла 200м. Стандартные неполяризующиеся электроды укладывались в землю ниже границы промерзания.

Был получен отклик, который радикально отличается от теоретического сигнала электродинамического становления, и имеет два перехода через 0. На рисунке 3.28 приведено это сравнение, причем, становление рассчитано для разреза, уточненного по ЗСБ. Зарегистрированный нами сигнал в конце рассчитанного процесса становления в 500 раз его превышает. Проводились зондирования с разными длительностями питающего импульса при различных наборах питающих лучей, что слабо влияло на характер отклика.

Таким образом, был зафиксирован сложный процесс, в котором значительную и, из-за краткости процесса становления, основную роль во второй половине процесса имеют другие процессы, вероятно, процессы ВП. Через полгода, летом 1993 года (т.е., в других сезонных условиях), полевой

эксперимент был повторно проведен на том же месте. Новые результаты экспериментов подтвердили картину, по крайней мере, качественно.

Математические расчеты, которые были проведены в то время с помощью имевшихся программ, никак не объясняли получавшуюся картину сигнала с двумя переходами через ноль. Поэтому исследования радиальной электрической составляющей поля при возбуждении среды с помощью КЭД оказались в подвешенном состоянии из-за необъяснимости получаемых результатов.

Для проведения дальнейших работ необходимо было создать математическое обеспечение, с использованием которого можно было понять, чем может быть обусловлено такое поведение сигнала при измерении радиальной электрической компоненты поля.

Спустя 10 лет в лаборатории электромагнитных полей Института геофизики СО РАН Е.Ю.Антоновым была создана прямая задача для расчета сигналов для такого источника с учетом, как конфигурации источника, так и параметров ВП в среде [58, 59]. Создание программы позволило объяснить результат первого полевого эксперимента по измерению электрической радиальной составляющей.

На рисунке 3.28 показан сигнал, полученный с использованием нового математического аппарата. Видно качественное совпадение полевой и расчетной кривой причем, сопротивление слоистой среды, определялось по результатам независимых измерений (ЗСБ), а параметры ВП подобраны. Мы убедились, моделируя сигнал, что сложный характер временного отклика определяется геометрией источника и влиянием процессов ВП, а вот индукционная составляющая играет весьма незначительную роль, и уже после 10 мс пренебрежимо мала.

Таким образом, следует исследовать второе направление, связанное с использованием ТМ-поляризованного поля и установки КЭД – измерение радиальной электрической составляющей поля. Из результатов первого

полевого эксперимента видно, что подобные исследования необходимо проводить с учетом процессов вызванной поляризации.

Для проведения полноценной интерпретации данных радиальной составляющей поля от КЭД необходимо понять характер поведения сигналов в различных геоэлектрических средах, как с учетом вызванной поляризации, так и без нее.

3.3.2 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и ABMN при изменении поляризационных параметров

В данной части работы проведен сравнительный анализ двух установок: КЭД и линия АВ. Для четырех типов моделей сравнивалось относительное изменение сигнала, как для КЭД, так и для линии АВ, в случае наличия и отсутствия ВП. Относительное изменение сигналов вычислялось по формуле:

$$\eta = \left| \frac{(E_0 - E_{ВП})}{E_0} \right| \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где η – относительное изменение, E_0 – значение сигнала без учета ВП, $E_{ВП}$ – значение сигнала с учетом ВП. Ниже приводятся результаты моделирования.

На рисунке 3.29-3.30 показаны относительное изменение сигнала в процентах и сами сигналы для первой модели. Как видно из рисунков измеряемый уровень сигналов (автор считал этим уровнем сигнал с величиной более 1 мкВ) в случае линии достигается на времени примерно 10 сек. В случае КЭД это время составляет 100 мс.

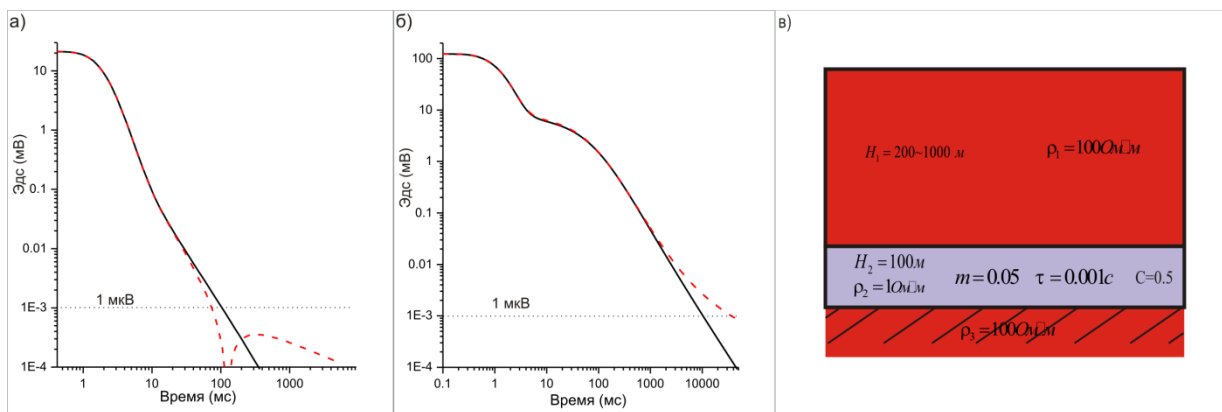


Рис. 3.29 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 1. Сплошная линия – сигналы без учета ВП, штриховая линия – сигналы с учетом ВП.

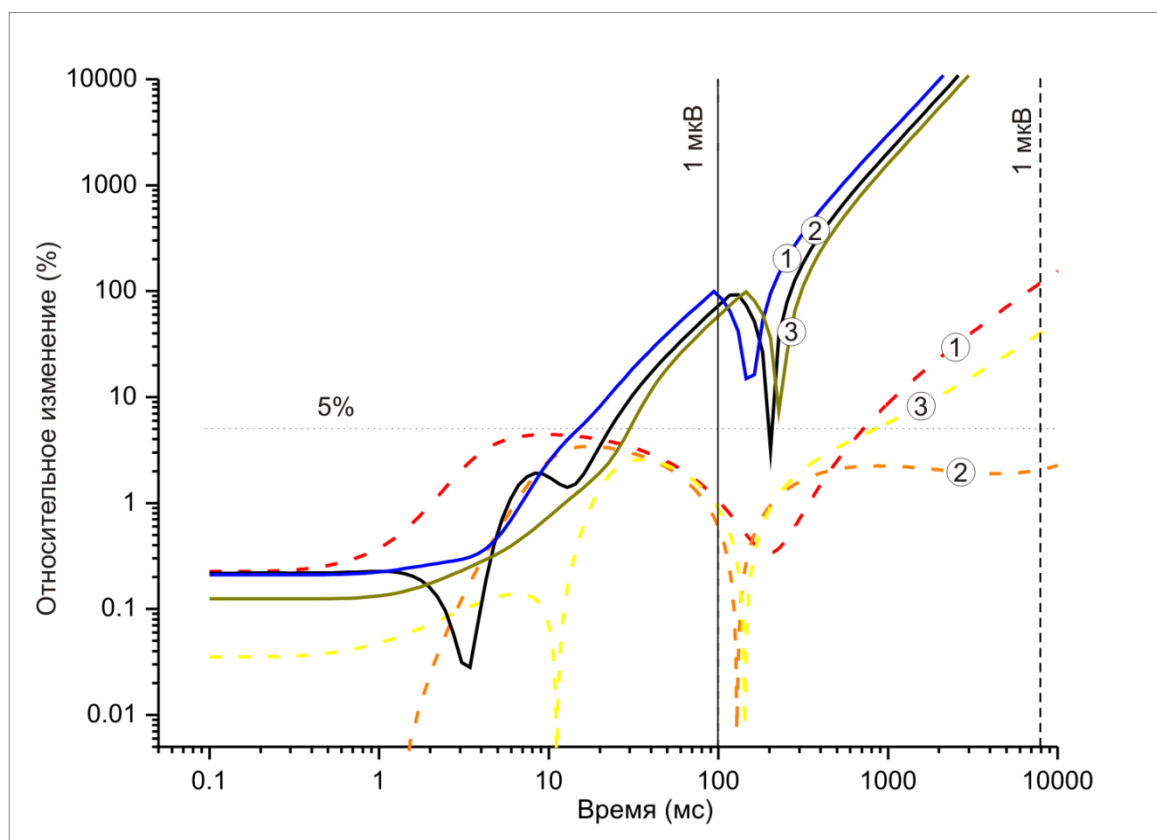


Рис. 3.30 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 1-ой модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 400м, 2 – толщина верхнего слоя 600м, 3 – толщина верхнего слоя 1000м.

Также видно (рис. 3.30), что относительные изменения сигнала для установки КЭД мало меняются при изменении глубины тонкого слоя и меняются в пределах от 5 до 70% в измеряемом диапазоне значений сигнала (до 1 мкВ). Для установки АВМН относительные изменения разнятся для разной толщины тонкого слоя, но значения относительного изменения сравнительно такие же.

Из рисунка видно, что для модели 1 использование КЭД дает примерно такие же результаты что и использование линии АВ, а при уменьшении уровня измеряемого сигнала КЭД даже будет более предпочтителен.

На рисунке 3.31 показано относительное изменение сигнала в процентах и сами сигналы для второй модели. Как видно из рисунков, измеряемый уровень сигналов (1 мкВ), в случае линии, достигается на времени более 10 сек. В случае КЭД это время составляет 1 сек.

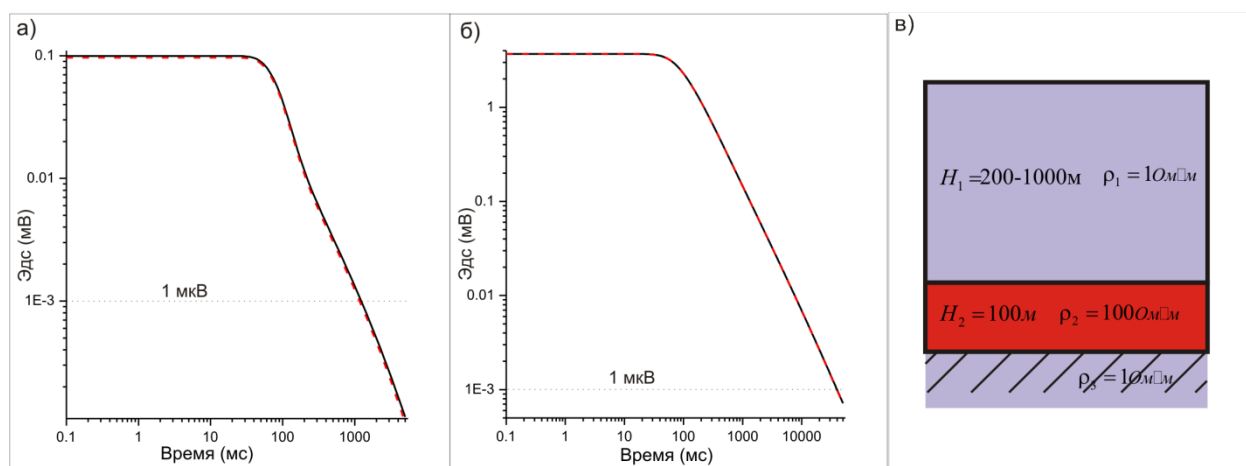


Рис. 3.31 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 2 .
Сплошная линия – сигналы без учета ВП, штриховая линия – сигналы с учетом ВП.

Как видно из рисунка 3.32, на этих временах относительное изменение сигнала для КЭД составляет примерно 10 процентов для всех толщин верхнего слоя, в то время как для линии АВ, мы имеем относительное изменение не выше 1 процента. Кроме того, на начальных временах относительное изменение для КЭД составляет величину порядка процента, а

для линии АВ на порядок меньше. То есть для данной модели среды использование КЭД более предпочтительно, чем использование линии АВ, причем это наблюдается для всех времен исследования.

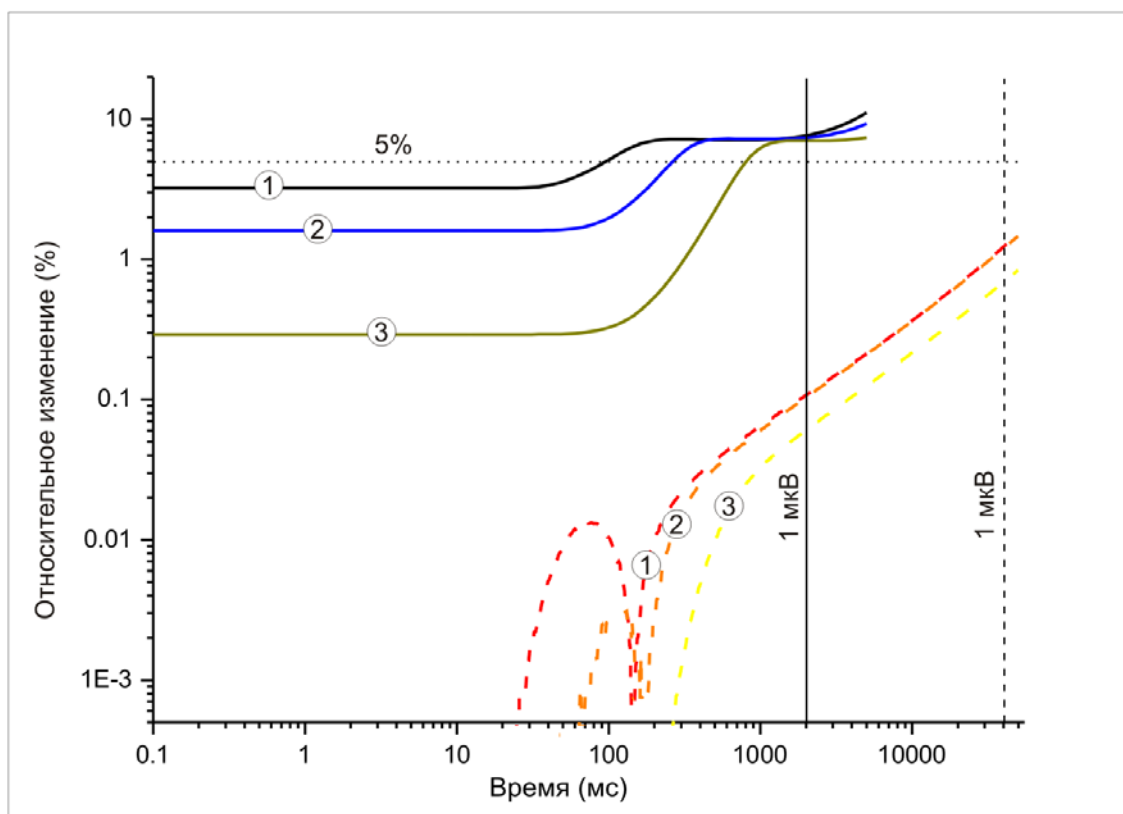


Рис. 3.32 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 2-ой модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 400м, 2 – толщина верхнего слоя 600м, 3 – толщина верхнего слоя 1000м.

На рисунках 3.33-3.34 показано относительное изменение сигнала в процентах и сами сигналы для третьей модели. Как видно из рисунков измеряемый уровень сигналов (1 мкВ) в случае линии АВ достигается на времени более 10 сек. В случае КЭД это время составляет 1 сек. На этих временах относительное изменение сигнала для КЭД и линии АВ составляет около 1 процента или даже ниже. То есть для данной модели среды использование КЭД и линии АВ дает одинаково низкие результаты. Можно

сказать, что для подобного типа моделей процессы ВП не влияют на измеряемый сигнал при возбуждении среды как КЭД, так и линией АВ.

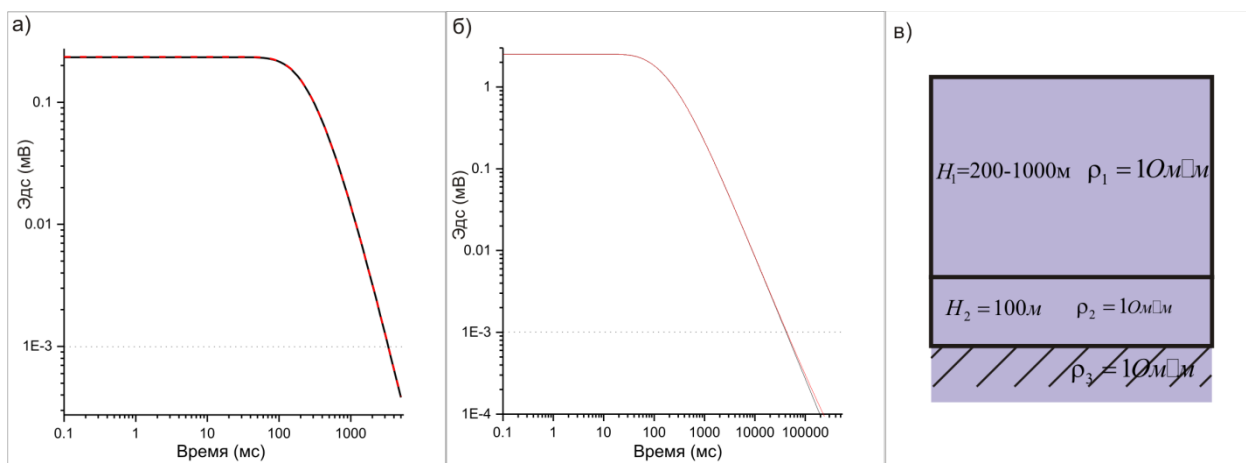


Рис. 3.33 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 3 .
Сплошная линия – сигналы без учета ВП, штриховая линия – сигналы с учетом ВП.

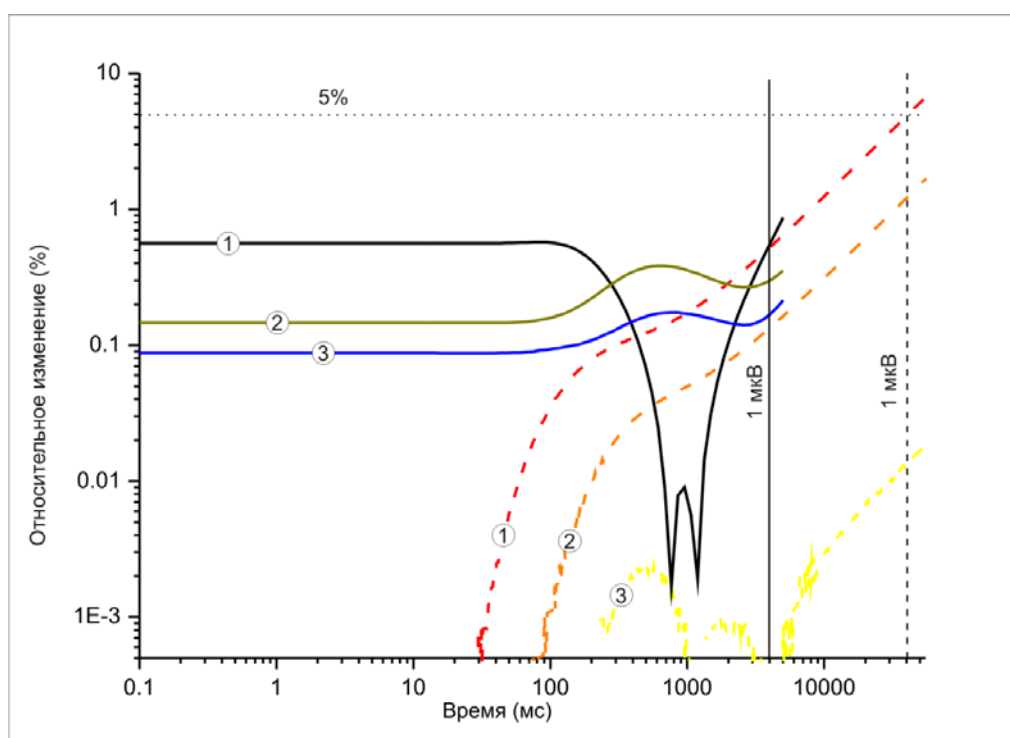


Рис. 3.34 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 3-ей модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 400м, 2 – толщина верхнего слоя 600м, 3 – толщина верхнего слоя 1000м.

На рисунке 3.35 показаны сигналы для четвертой модели. Как видно из рисунков измеряемый уровень сигналов (1 мкВ) в случае линии достигается на времени порядка 10 сек. В случае КЭД это время составляет 100 мс.

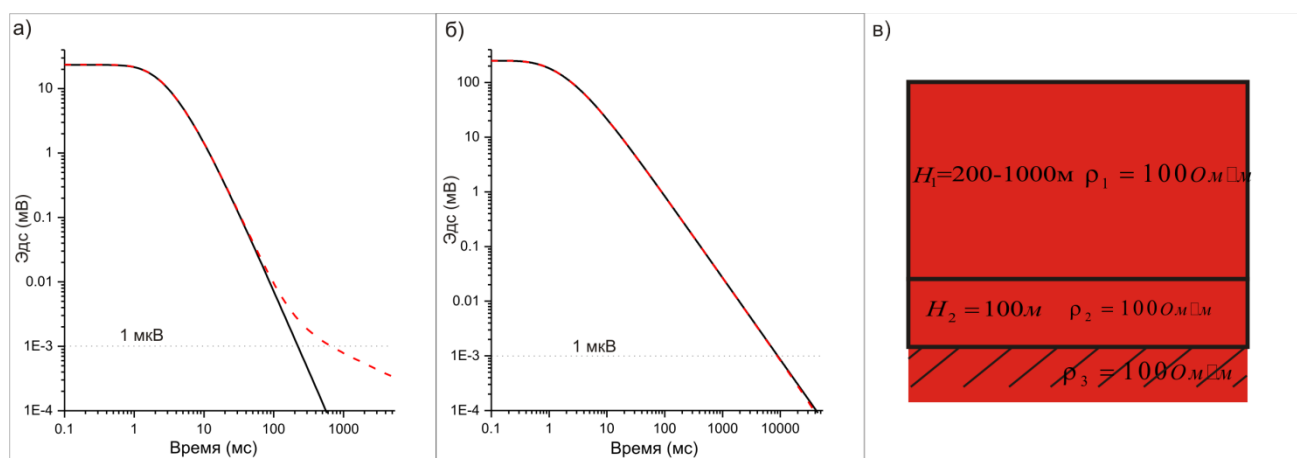


Рис. 3.35 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 4 . Сплошная линия – сигналы без учета ВП, штриховая линия – сигналы с учетом ВП.

На этих временах относительное изменение сигнала (рис. 3.36) для КЭД и линии составляет от 10 до 100 процентов в зависимости от толщины верхнего неполяризованного слоя. Причем относительное изменение сигнала увеличивается равномерно с увеличением времени исследований. Можно сказать, что и для КЭД и для линии АВ, данный тип модели является наиболее предпочтительным в смысле выделения именно процессов ВП.

Необходимо сказать, что в сигналах от КЭД для толщин верхнего слоя 600 метров и более мы видим переход сигнала через 0. В свою очередь это может являться дополнительным поисковым признаком, поскольку переход сигнала через 0 можно хорошо отследить с помощью измерительной аппаратуры даже при низком уровне сигнала и это может стать хорошей возможностью для проведения профилирования на площади работ.

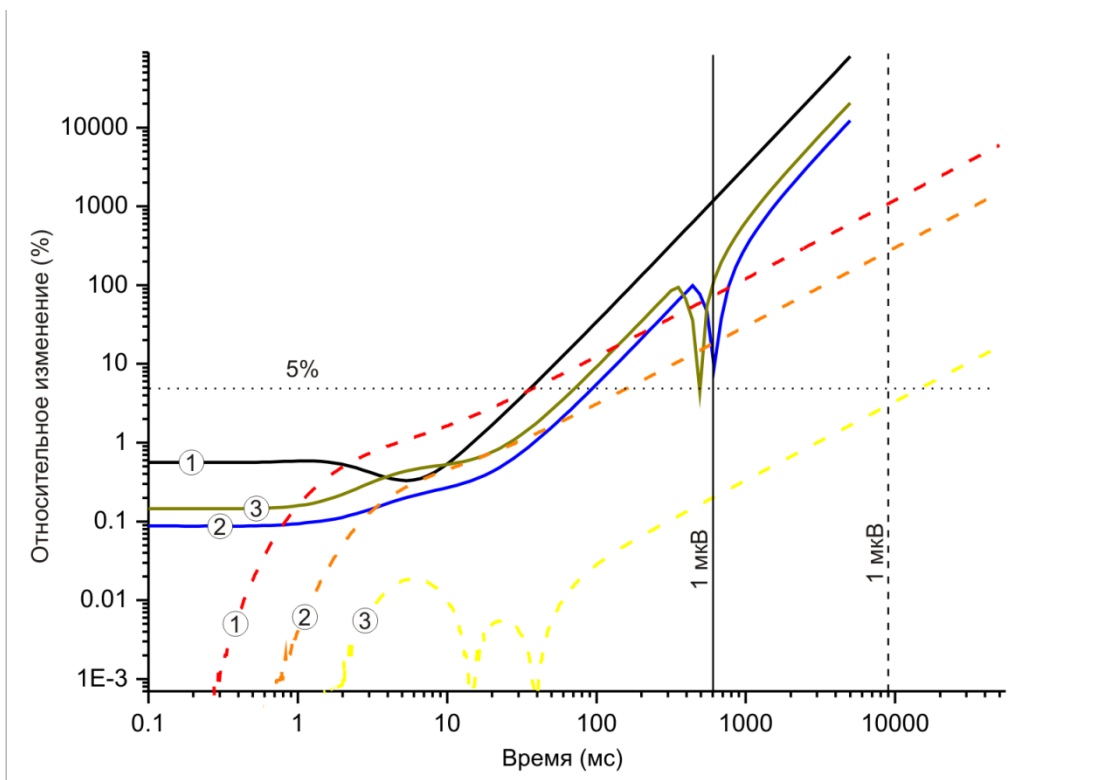


Рис. 3.36 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 4-ой модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 400м, 2 – толщина верхнего слоя 600м, 3 – толщина верхнего слоя 1000м.

В качестве вывода данного параграфа можно сказать следующее: для всех исследованных моделей сред КЭД по сравнению с линией АВ имеет сравнимые возможности в области исследования процессов ВП. В некоторых случаях (модель 2) использование КЭД более предпочтительно. Но можно сказать, что в общем случае использование КЭД дает такие же результаты, как и использование линии АВ.

3.3.3 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и АВМN при изменении глубины тонкого слоя

В данной части работы проведен сравнительный анализ двух установок: КЭД и линия АВ. Для 2-ух типов моделей (из наших 4) сравнивалось относительное изменение сигнала, как для КЭД, так и для

линии АВ, для различной глубины тонкого слоя толщиной 100 метров с отличным сопротивлением по сравнению с вмещающей средой. Относительное изменение сигналов вычислялось по формуле:

$$\eta = \left| \frac{(E_0 - E_H)}{E_0} \right| \cdot 100\%, \quad (3.8)$$

где η – относительное изменение, E_0 – значение сигнала без тонкого слоя, E_H – значение сигнала с учетом тонкого слоя на определенной глубине. Ниже приводятся результаты моделирования.

Как видно из рисунка 3.38 для модели 1 относительное изменение сигналов для обеих установок примерно одинаковы и невелики, примерно до 20 %. Для более поздних времен наблюдается другая ситуация. Для установки КЭД-MN максимум относительного изменения остается примерно на одном уровне (80-90 %) изменяется только время, на котором выявляется этот максимум.

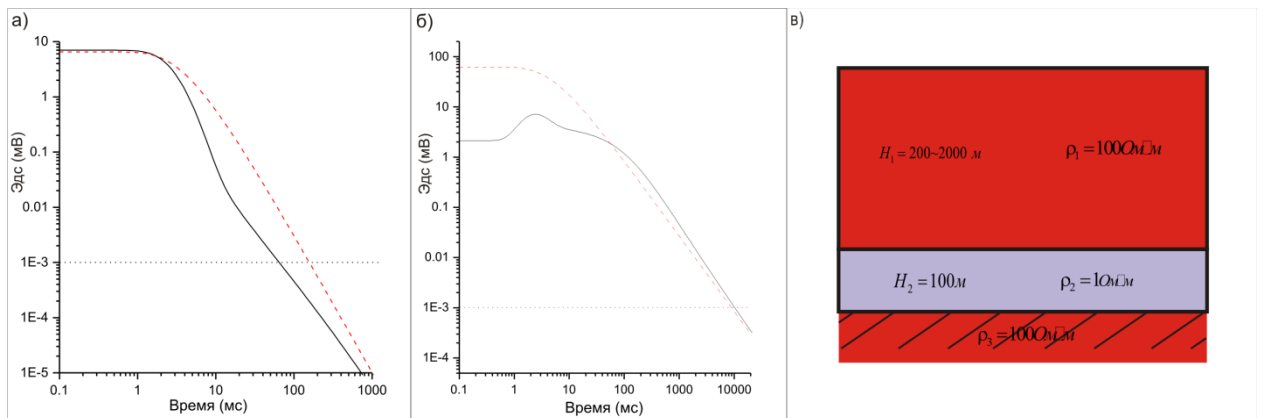


Рис. 3.37 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 1 .
Сплошная линия – наличие тонкого слоя на глубине 500м, штриховая линия – отсутствие тонкого слоя.

Для установки АВМN максимум относительного изменения также смещается по времени, но при этом заметно падает. То есть, при увеличении глубины установка АВМN хуже чувствует изменения по сравнению с установкой КЭД-MN для модели 1.

Также необходимо отметить, что падение сигнала для ТМ-поля происходит заметно быстрее и уже на временах 100 мс сигнал становится слишком слаб. Таким образом, даже при высокой чувствительности установки КЭД-MN, реальная достижимая глубина исследований составляет 2000 м. В то же время, для установки АВМN можно измерять до времен порядка 10 секунд, и видеть изменения сигнала, которые связаны с изменениями на глубинах более 2000 м, но относительные изменения в этом случае невелики и составляют единицы процентов.

Похожая картина видна и для модели 2 (рис. 3.40) с той лишь разницей, что максимум относительных изменений для установки КЭД-MN заметно больше, чем для установки АВМN, примерно 100% против 30%.

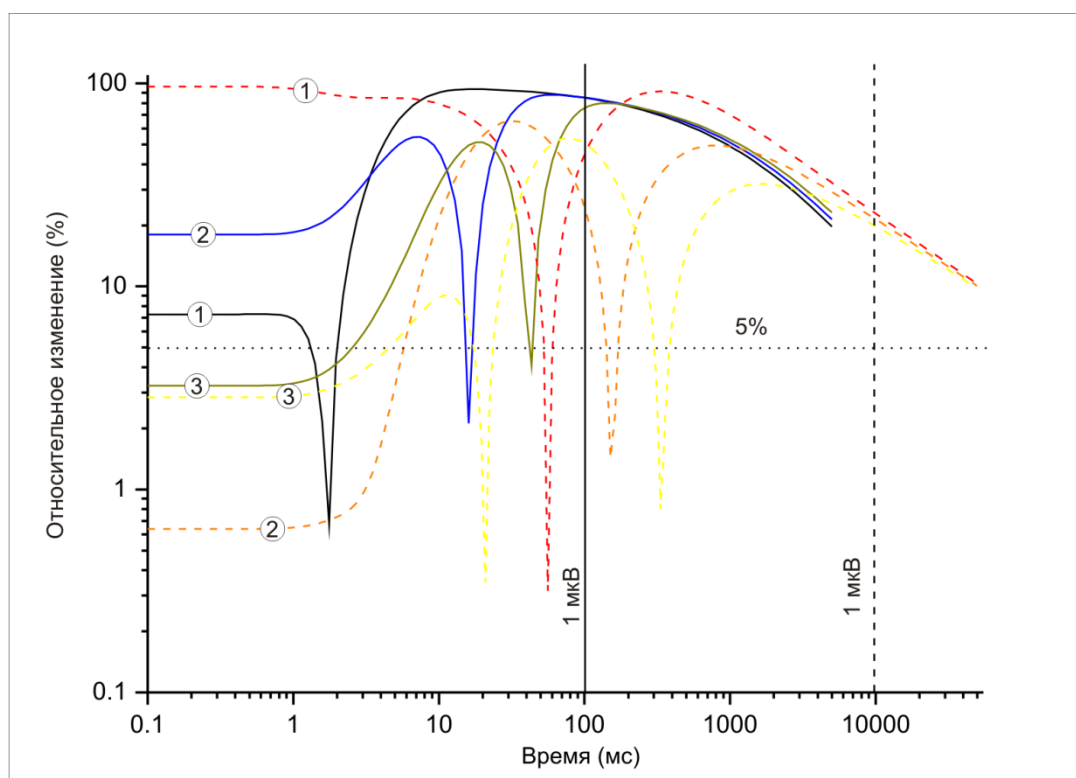


Рис. 3.38 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 1-ой модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 500м, 2 – толщина верхнего слоя 1200м, 3 – толщина верхнего слоя 2000м.

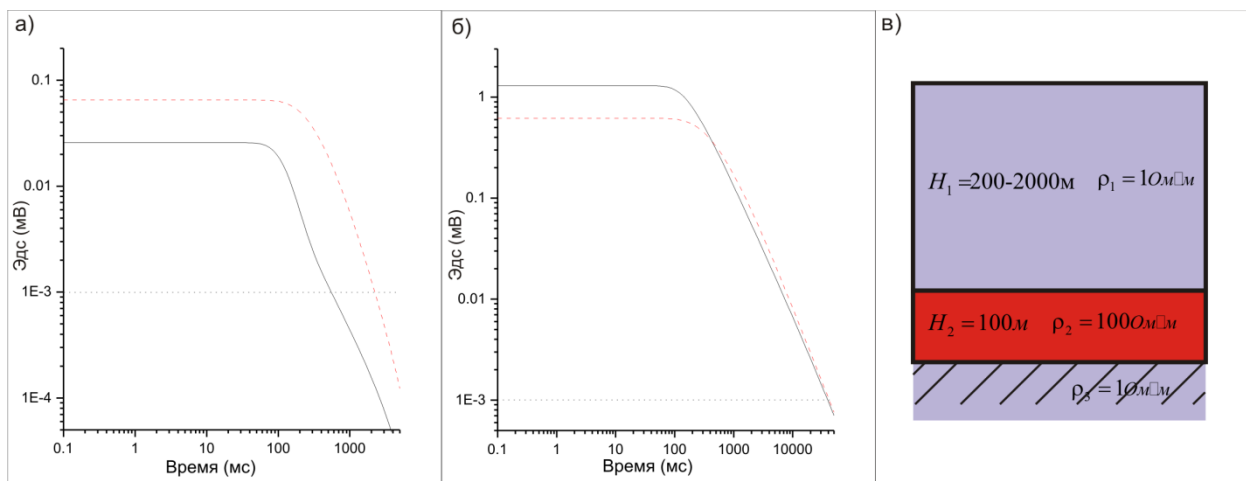


Рис. 3.39 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 2 . Сплошная линия – наличие тонкого слоя на глубине 500м, штриховая линия – отсутствие тонкого слоя.

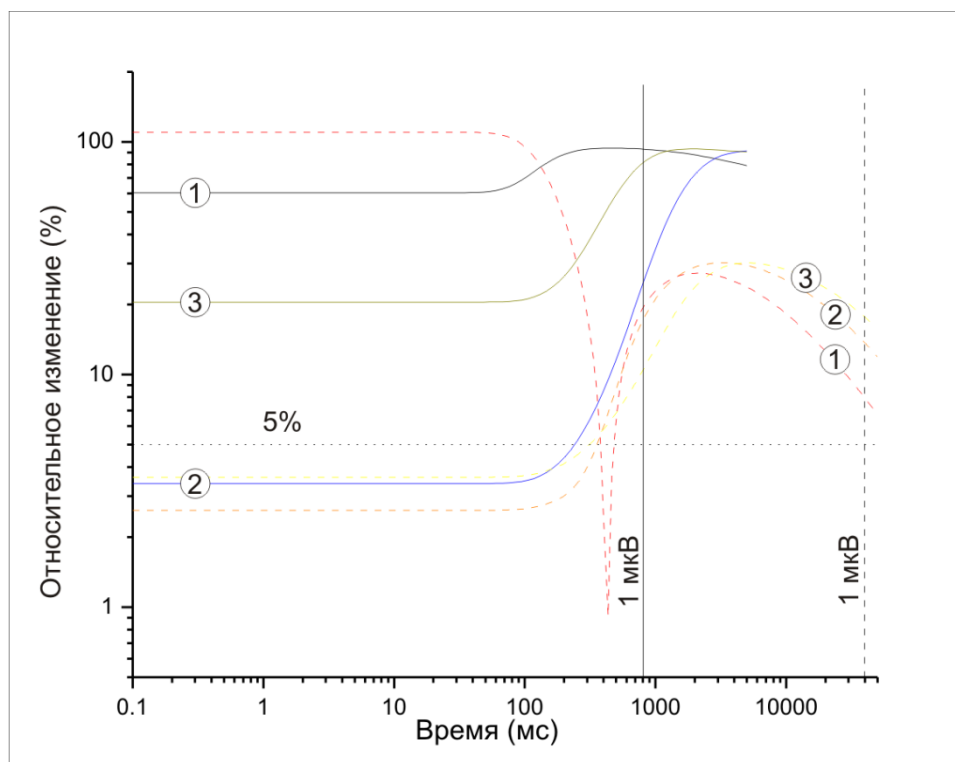


Рис. 3.40 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 2-ой модели среды: 1 – толщина верхнего слоя 500м, 2 – толщина верхнего слоя 1200м, 3 – толщина верхнего слоя 2000м.

То есть можно сказать, что установка КЭД-MN более чувствительна к изменению глубины тонкого слоя, но это преимущество проявляется в основном на поздних временах, где сигналы достаточно слабы.

3.3.4 Сравнение сигналов от установок КЭД-MN и АВМN при изменении сопротивления тонкого слоя

В данной части работы проведен сравнительный анализ двух установок: КЭД и линия АВ. Для четырех типов моделей сравнивалось относительное изменение сигнала, как для КЭД, так и для линии АВ, для различных сопротивлений слоя толщиной 100 метров, расположенного на глубине 600 метров. Относительное изменение сигналов вычислялось по формуле:

$$\eta = \left| \frac{(E_0 - E_\rho)}{E_0} \right| \cdot 100\%, \quad (3.9)$$

где η – относительное изменение, E_0 – значение сигнала при отсутствии тонкого слоя E_ρ – значение сигнала с учетом тонкого слоя с отличным сопротивлением. Ниже приводятся результаты моделирования.

Как видно из рисунков 3.41-3.42 для модели 1 относительное изменение сигналов для обеих установок примерно одинаковы для всех диапазонов времен измерения. Эти изменения в максимуме составляют примерно 20 %.

Для модели 2 (рис. 3.43-3.44) ситуация немного предпочтительнее для установки КЭД-MN. Максимум относительного изменения сигналов в этом случае спадает при уменьшении контрастности сопротивления тонкого слоя и вмещающей среды.

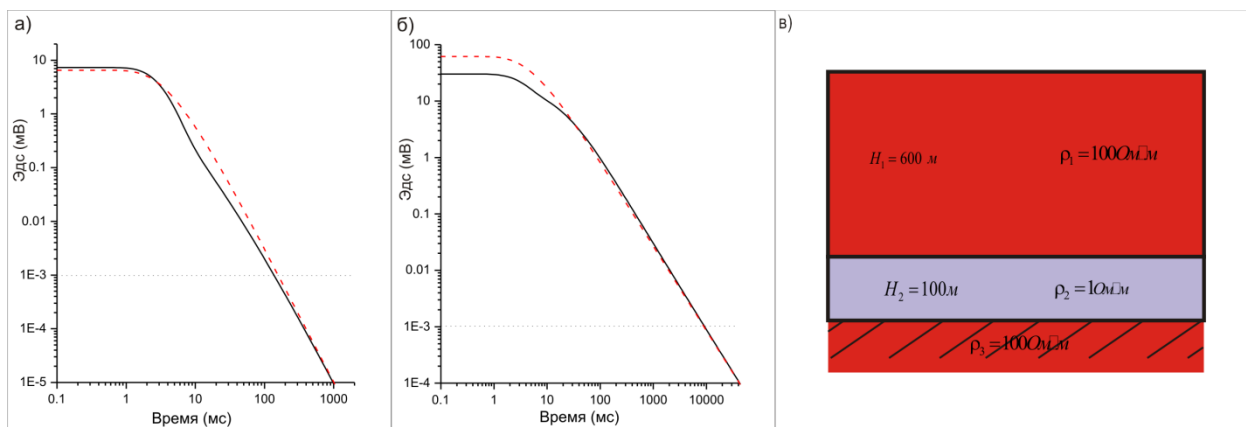


Рис. 3.41 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 1 . Сплошная линия – наличие тонкого слоя глубине 600м с сопротивлением $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, штриховая линия – отсутствие тонкого слоя.

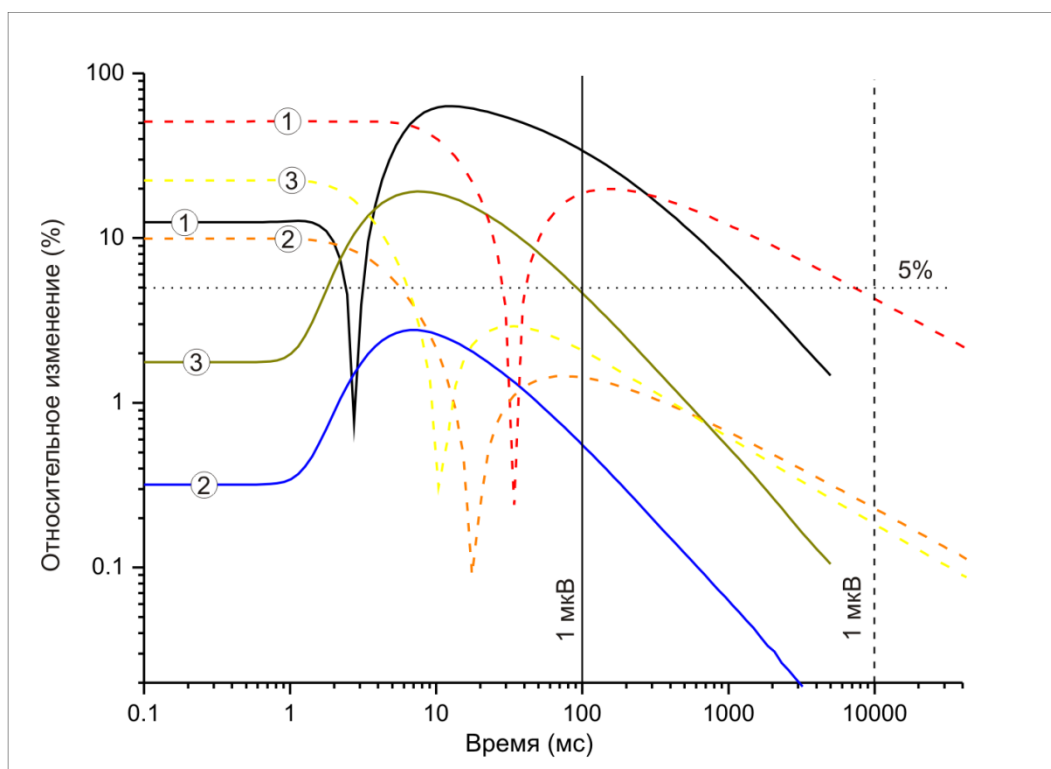


Рис. 3.42 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 1-ой модели среды: 1 – сопротивление тонкого слоя $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, 2 – сопротивление тонкого слоя $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, 3 – сопротивление тонкого слоя $400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

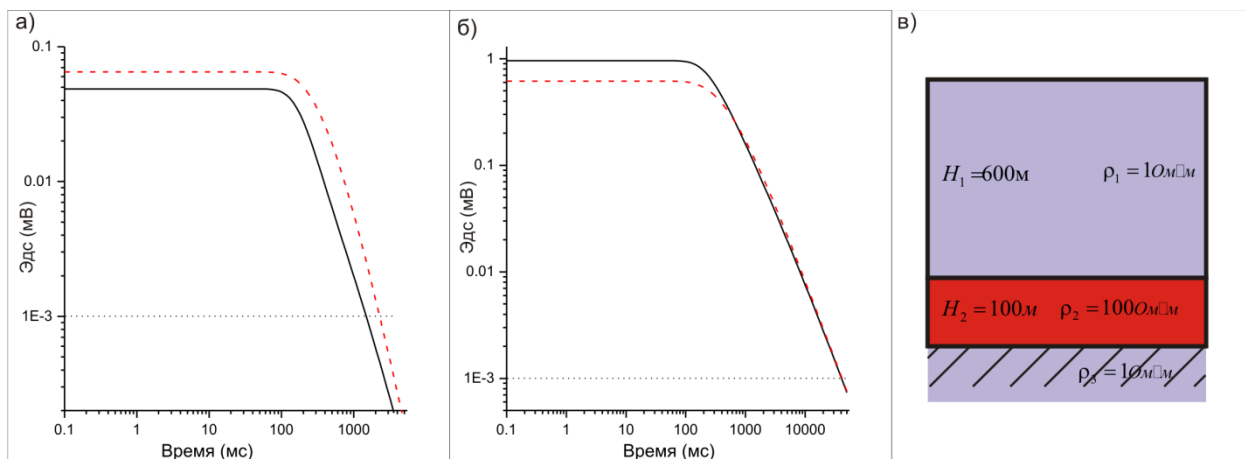


Рис. 3.43 Сигналы от установок: а) КЭД б) линия АВ; в) модель среды 2 . Сплошная линия – наличие тонкого слоя глубине 600м с сопротивлением 5 Ом*м, штриховая линия – отсутствие тонкого слоя.

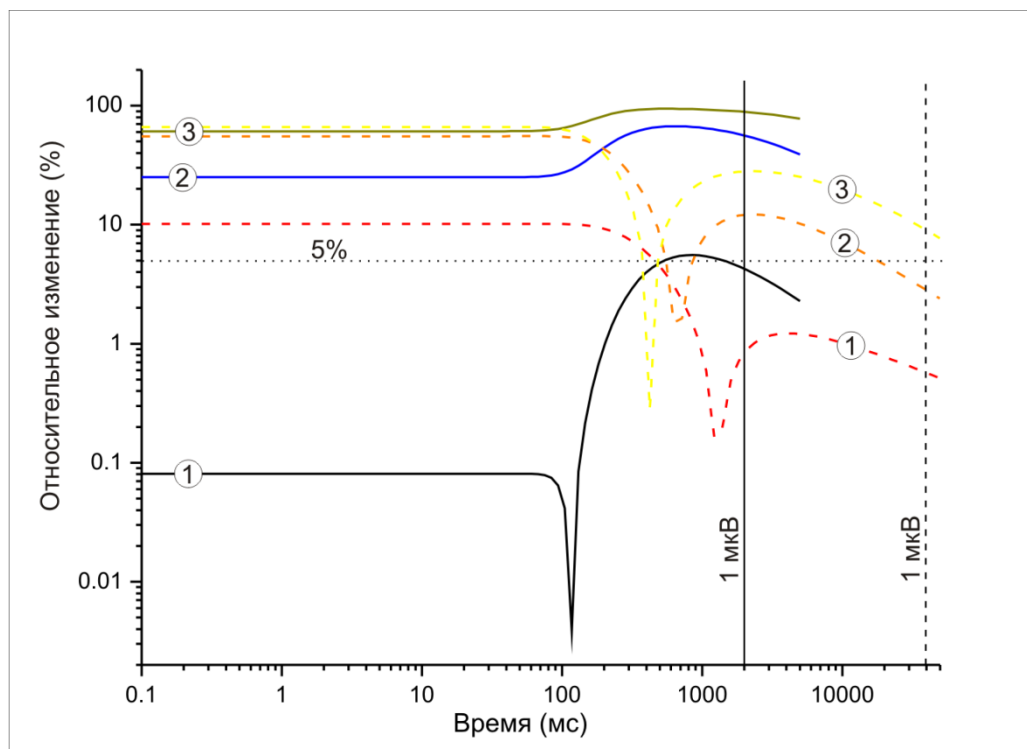


Рис. 3.44 Относительное изменение сигналов от установок КЭД (сплошные линии) и линия АВ (штриховые линии) для 2-ой модели среды: 1 – сопротивление тонкого слоя 5 Ом*м, 2 – сопротивление тонкого слоя 50 Ом*м, 3 – сопротивление тонкого слоя 400 Ом*м.

Из графиков относительного изменения для модели 1 и 2 можно увидеть, что относительные изменения сигнала величиной в 5 % достигаются для установки КЭД-MN при контрастах равных 2-2.5, для установки АВМN – при контрастах равных 3-3.5. Из этого также можно сделать вывод, что для исследуемых моделей, чувствительность установки КЭД-MN к изменению сопротивления погруженного слоя выше, чем для установки АВМN.

Отрицательным фактором также остается быстрый спад поля при возбуждении среды установкой КЭД-MN, что делает сложным выявление достаточно глубоко погруженных слоев при слабых контрастах по сопротивлению.

В итоге можно сказать, что установка КЭД-MN также является не менее чувствительной к изменению сопротивления тонкого слоя, чем установка АВМN.

3.4 Выводы

Результатом исследований приведенных в третьей главе можно считать следующее: даны методические рекомендации по проведению полевых исследований с использованием установки КЭД-MN, которые включают оценку влияния взаимного геометрического расположения и относительных размеров генераторно-измерительного комплекса, показано, что радиальная электрическая составляющая поля от источника КЭД чувствительна к изменениям геоэлектрических параметров среды, таких как сопротивление и глубина залегания слоя, а также к поляризационным параметрам, по сравнению с установкой ABMN.

На основе этого можно сформулировать второй защищаемый научный результат:

численно показано, что установка КЭД-MN по сравнению с установкой ABMN является таким же эффективным средством определения геоэлектрических параметров среды (сопротивление, глубина залегания и поляризационные параметры слоя). На основе численного моделирования процессов становления поля в методе ЗВТ разработаны методические рекомендации по проведению полевых работ с использованием установки КЭД-MN, учитывающие геометрические факторы генераторно-измерительного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является развитие новых методических и интерпретационных средств для метода зондирования вертикальными токами, которые позволили упростить и ускорить процесс обработки данных при регистрации магнитной составляющей поля. Кроме того, были проведены исследования по эффективности регистрации радиальной электрической компоненты поля от КЭД.

Конкретные результаты состоят в следующем:

Во-первых, разработаны и программно реализованы алгоритмы обработки данных метода ЗВТ-М для нормировки площадных и профильных сигналов ЗВТ в зависимости от расстояния и времени, сшивки полевых данных от нескольких источников КЭД, проведения предварительной обработки полевых данных.

Кроме того, в работе приведены примеры полевого использования разработанных алгоритмов для обработки данных метода ЗВТ при работах на рудных и нефтегазовых объектах. Все эти примеры показывают большую эффективность созданного программного обеспечения по сравнению с тем, что было до исследований, приведенных в данной работе.

Во-вторых, на основе имеющихся расчетных программ для различных источников (КЭД-MN, ABMN) проведено моделирование, с помощью которого численно показано, что установка КЭД-MN по сравнению с установкой ABMN является таким же эффективным средством определения геоэлектрических параметров среды (сопротивление, глубина залегания и поляризационные параметры слоя). На основе численного моделирования процессов становления поля в методе ЗВТ разработаны методические рекомендации по проведению полевых работ с использованием установки КЭД-MN, учитывающие геометрические факторы генераторно-измерительного комплекса.

В дальнейшем планируется продолжить работы в области развития методики обработки, а именно: реализовать дополнительно несколько алгоритмов сшивки данных от нескольких источников, уточнить способ привязки данных по глубине при построении профильных сигналов ЗВТ, адаптировать процедуры расчета сигнала при измерении электрической компоненты поля для программного комплекса «ЗаВеТ», разработать полноценный графический интерфейс для полноценной интерпретации сигналов радиальной электрической составляющей и др.

В области изучения данных измерений радиальной электрической компоненты поля планируется подробно изучить влияние процессов ВП на измеряемые сигналы, провести анализ возможностей установки КЭД-МН для моделей сред приближенных к геолого-геофизическим условиям различных регионов нашей страны, детально исследовать влияние каждого геоэлектрического параметра (сопротивление, глубина и параметры ВП) в отдельности на измеряемые сигналы, провести подробный анализ влияния геометрии установки на измеряемый сигнал, что позволит дать более точные методические рекомендации при проведении полевых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ определения края протяженной геоэлектрической неоднородности. [Текст] А.с N 1664042. /Могилатов В.С. 1989.
2. Способ геоэлектроразведки. [Текст] А.с. N 1760873(СССР). /Тригубович Г.М., Захаркин А.К., Могилатов В.С.
3. Балашов Б.П., О разработке аппаратного комплекса электроразведочной системы зондирования вертикальными токами. [Текст] / Б.П. Балашов, В.С. Могилатов // Геофизика. - 1996. - N 3. - с. 30-33.
4. Бурсиан В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. [Текст] / В.Р. Бурсиан // Л.: Недра, – 1972.
5. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. [Текст] / Л.Л. Ваньян // М.: Недра, – 1965, – С.109.
6. Геологическая карта Норильского рудного поля. [Карта] // Всесоюзный ордена Ленина научно исследовательский геологический институт. – Ленинград, 1981. Ред. Шерман М.Л.
7. Гольдман М.М. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально – слоистое полупространство. [Текст] / М.М. Гольдман, В.С. Могилатов // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике. – Сб. научных трудов ИГиГ СО АН СССР. – Новосибирск, – 1978, – С. 123-138.
8. Дахнов В.Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. [Текст] / В.Н Дахнов // - М.:Л.: Гостоптехиздат, – 1953. – 497с.
9. Жданов М.С. Электроразведка. [Текст] / М.С. Жданов // М.: Недра, – 1986, – 316 с.

10. Заборовский А.И. Электроразведка. [Текст] / А.И. Заборовский // М.: – Гостоптехиздат, – 1963. – 423с.
11. Задорожная В.Ю. Учет процессов вызванной поляризации в многослойных разрезах при индукционном зондировании. [Текст] / Задорожная В.Ю., В.П. Лепешкин // Физика земли, – 1998, – №4, – с. 55-61.
12. Захаркин А.К. Физическое моделирование метода ЗСБ. [Текст] / А.К. Захаркин, Н.Н. Тарло // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. – Сб. научных трудов СНИИГГиМС. - Новосибирск, – 1988г, – С. 30-44.
13. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. [Текст] / Ф.М. Каменецкий // М: ГЕОС, – 1997, – 162 с.
14. Каменецкий Ф.М., Тимофеев В.М. О возможности разделения поляризационных и индукционных эффектов. [Текст] / Ф.М. Каменецкий, В.М. Тимофеев // Изв. АН СССР, – Физика Земли, – 1984, – №12, – с. 89-94.
15. Каменецкий Ф.М., Тимофеев В.М., Сидоров В.А., Яхин А.М. Индукционные электромагнитные переходные процессы в проводящей поляризующейся среде [Текст] / Ф.М. Каменецкий [и др.] // Электромагнитная индукция в верхней части земной коры. – М.: Наука, – 1990, – с.14-40.
16. Кауфман А.А. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. [Текст] / А.А. Кауфман, Г.М. Морозова // Новосибирск: Наука, – 1970. – 124 с.

- 17.Кожевников Н.О. Влияние частотной дисперсии диэлектрической проницаемости на результаты измерений в методе переходных процессов. [Текст] / Н.О. Кожевников // Иркутск, – 1991. – 21 с. – Деп. ВИНТИ 25.02.91. N 882-B91.
- 18.Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. [Текст] / В.А. Комаров // Л.: Недра, – 1980, –390 с.
- 19.Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации. [Текст] / В.В. Кормильцев // М.: Наука, – 1980, – 256 с.
- 20.Кормильцев В.В. Электроразведка в поляризующихся средах. [Текст] / В.В. Кормильцев, А.Н. Мезенцев // Свердловск: УрО АН СССР, – 1989. – 127с.
- 21.Корольков Ю.С. Зондирование становлением электромагнитного поля для поисков нефти и газа. [Текст] / Ю.С. Корольков // М.: Недра, –1987.
- 22.Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. [Текст] / К. Ланцош // М.:Физматгиз, – 1961.
- 23.Легейдо П.Ю. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов [Текст] / П.Ю. Легейдо, М.М. Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский // Геофизика, – 1995, – №4, –с. 42-45.
- 24.Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн. [Текст] / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин //- М.: Радио и связь, – 1983. – 295с.
- 25.Могилатов В.С. Вторичные источники и линеаризация в задачах геоэлектрики. [Текст] / В.С. Могилатов // Геология и геофизика. – 1999. – N 7. – С.1102-1108.
- 26.Могилатов В.С. Круговой электрический диполь – новый источник для электроразведки [Текст] / В.С. Могилатов // Изв.РАН. Сер.: Физика Земли. – 1992. – N 6. – с 97-105.

27. Могилатов В.С. Возбуждение электромагнитного поля в слоистой Земле горизонтальным токовым листом [Текст] / В.С. Могилатов // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1998. - N 5. - С. 45-53.
28. Могилатов В.С. Индуктивный, смешанный и гальванический источники в электроразведке становлением поля [Текст] / В.С. Могилатов // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997.- N 12. - С. 42-51.
29. Могилатов В.С. Нестационарное поле кругового электрического диполя в однородной Земле. [Текст] / В.С. Могилатов // Геология и геофизика. - 1997.- т.38, N 11.- С. 1849-1855.
30. Могилатов В.С. Поля электрического и магнитного типов в электроразведке с контролируемыми источниками.: дис. ... док. техн. наук. : 04.00.12 : / Могилатов Владимир Сергеевич – Новосибирск, 2000. – 398 с. – Библиогр.: с. 380-398.
31. Могилатов В.С. Теоретический анализ возможностей зондирования вертикальными токами (ЗВТ). [Текст] / В.С. Могилатов // Геология и геофизика. - 1996. - Том 37, N 7. - с.112-119.
32. Могилатов В.С. Зондирование вертикальными токами – качественный шаг в развитии индукционной электроразведки. [Текст] /В.С. Могилатов, Б.П. Балашов// Разведочная геофизика. - 1998. - Вып. 4. - 60 с.
33. Могилатов В.С. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ) [Текст] /В.С. Могилатов, Б.П. Балашов // Изв.РАН. Сер.:Физика Земли.- 1994.- N 6.- С.73-79.
34. Могилатов В.С. Становление поля от источника, заземленного в обсаженной скважине [Текст] /В.С. Могилатов, Н.В. Горошко // Геология и геофизика. - 1986. – N 12. - С. 101-105.
35. Могилатов В.С. Поле кругового электрического диполя(КЭД) при постоянном токе [Текст] /В.С. Могилатов, А.В. Злобинский // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли. – 1995. - N 11. - с 25-29.

36. Могилатов В.С. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». [Текст] / В.С. Могилатов, А.К. Захаркин, А.В. Злобинский // Новосибирск: академическое издательство «Гео», – 2007
37. Могилатов В.С. Результаты работ по оконтуриванию залежей нефти в Татарстане методом зондирования вертикальными токами. [Текст] / В.С. Могилатов [и др.] // Геофизика, – №5, – 2003. – стр. 47-54
38. Могилатов В.С. Результаты применения технологии зондирования вертикальными токами (ЗВТ) для оконтуривания залежей углеводородов [Текст] / В.С. Могилатов, В.В. Потапов, С.А. Феофилов // Материалы Четвертых геофизических чтений имени В.В. Федынского. – г. Москва, – 2002г. – стр. 92-93
39. Опытные-методические работы методом зондирования вертикальными токами и вызванной поляризации с целью оконтуривания залежей нефти // ОАО «Татнефтегеофизика» НПУ «Казаньгеофизика», – Казань, – 2001г.
40. Отчет о научно-исследовательской работе по договору №225 «Разработка метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ) с целью оконтуривания залежей углеводородов» // Новосибирск, – 1993.
41. Отчет о работах Михайловской электроразведочной партии № 21/94-95, проведенных на территории Муслюмовского и Сармоновского районов республики Татарстан в 3-х книгах. / Ответственный исполнитель В.И. Богатов. // Казань, – 1996г, – ОАО "Татнефтегеофизика" Казанская ГЭ.
42. Способ геоэлектроразведки. [Текст] Патент N 1799512(СССР) / Тригубович Г.М., Хаов Ф.М., Могилатов В.С.
43. Способ геоэлектроразведки. [Текст] Патент РФ N 1062631 / Могилатов В.С. 1982. Опубликовано 23.12.83. Бюл. N 47.

- 44.Способ прямых поисков геологических объектов и устройство для его осуществления. [Текст] Патент РФ N 2028648. / Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1992. Опубликовано 09.02.95. Бюл. N 4.
- 45.Способ геоэлектроразведки. [Текст] Патент РФ N 2084929. / Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1993. Опубликовано 20.07.97. Бюл. N 20.
- 46.Способ прямого поиска геологических объектов и устройство для его осуществления. [Текст] Патент РФ N 2111514./ Балашов Б.П., Могилатов В.С., Зажаркин А.К., Саченко Г.В., Секачев М.Ю. 1996. Опубликовано 20.05.98. Бюл. N 14.
- 47.Способ прямых поисков локальных объектов. [Текст] Патент РФ N 2112995. /Могилатов В.С., Балашов Б.П. 1995. Опубликовано 10.06.98. Бюл. N 16.
- 48.Способ прямого поиска локальных объектов на шельфе Мирового океана и устройство для его осуществления в открытом море. [Текст] Патент РФ N 2116658. /Балашов Б.П., Могилатов В.С. 1995. Опубликовано 27.07.98. Бюл. N 21.
- 49.Потапов В.В. Новый метод электроразведки для поиска углеводородов. Некоторые результаты [Текст] / В.В. Потапов, В.С. Могилатов // Тезисы докладов IV Международной научно-практической геолого-геофизической конкурса-конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика-2003”, – Санкт-Петербург, 1-4 октября 2003г. – Стр. 158-159
- 50.Светов Б.С. Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. [Текст] / Б.С. Светов // М.: ИЗМИРАН, – 1984. – 183 с.
- 51.Табаровский Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. [Текст] / Л.А. Табаровский // Новосибирск.: Наука, – 1975, – 140 с.

52. Табаровский Л.А. Электромагнитные поля поперечно-электрического и поперечно-магнитного типа в многослойных средах [Текст] / Л.А. Табаровский // Электромагнитные методы исследования скважин. – Новосибирск.: Наука, – 1979, –с. 225-233.
53. Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в однородном проводящем полупространстве [Текст] / А.Н. Тихонов // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1946. – Т.Х, –N 3. – С. 213-231.
54. Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в неоднородной среде. [Текст] / А.Н. Тихонов, О.А Скугаревская // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геоф. - 1950. - Т.XIV, N 4. - С. 281-293.
55. Туровцев Д.М. Контактный метаморфизм норильских интрузий. [Текст] / Д.М. Туровцев // М.: Научный мир, – 2002. – 319 с.
56. Уэйт Дж. Геоэлектромагнетизм. [Текст] / Дж. Уэйт // М.: Недра, – 1987, – 235 с.
57. Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в земле [Текст] / С.М. Шейнман // Прикладная геофизика. – М.: Гостоптехиздат, – 1947, – Вып.9, – С. 3-55.
58. Эпов М.И. Исследование влияния параметров вызванной поляризации при нестационарных электромагнитных зондированиях сложно-построенных геологических сред. [Текст] / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Геология и геофизика, – 2000, т. 41, – №6, – с. 920-929
59. Эпов М.И. Прямые задачи электромагнитных зондирований с учетом дисперсии геоэлектрических параметров. [Текст] / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Физика Земли, – 1999, – № 3-4, – А48-А55.
60. Эпов М.И. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. [Текст] / М.И. Эпов, И.Н. Ельцов // Новосибирск: Изд. ОГГиМ СО РАН, –1992. - N 2. - 31 с.

61. Mogilatov V. A new method of geoelectrical prospecting by vertical electric current soundings: Journal of applied geophysics. [Text] / V. Mogilatov and B. Balashov // 1996, – Vol. 36. – pp.31-41.
62. Mogilatov V. New electrical prospecting for oil. Some results. [CD-ROM] / Mogilatov V., Potapov V., Feofilov S. // The 64th EAGE Conference and Exhibitions, Stavanger, Norway, 2-5 June 2003. – Extended abstract – V.2, – P052
63. Mogilatov V. Excitation of a half-space by a radial current sheet source. [Text] / Mogilatov V. // Pure and applied geophysics. 1996, – Vol. 147, – No.4. – pp.763-775.