

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
им. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН

На правах рукописи

ШЕИН Александр Николаевич

**РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ И СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ
ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -
к.т.н., доцент Е.Ю. Антонов

НОВОСИБИРСК

2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ	14
Глава 2. СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С УЧЕТОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ К ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ	23
2.1. Решение прямой задачи электродинамики о поле произвольного источника в горизонтально-слоистой изотропной среде (теоретическое обоснование).....	23
2.2. Численное моделирование электромагнитного сигнала в поляризующейся горизонтально-слоистой среде (с использованием формулы Cole-Cole).....	30
2.3. Исследование чувствительности компонент электромагнитного поля к параметрам поляризации Cole-Cole путем сравнительного анализа синтетических сигналов	34
2.4. Решение обратной задачи нестационарной электродинамики (совместная инверсия) методом нелинейной минимизации Нелдера- Мида	41
2.5. Разработка и программная реализация алгоритма совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом чувствительности индукционных и гальванических систем измерений к ВП	43

2.6. Тестирование разработанной схемы совместной инверсии на синтетических и экспериментальных данных	48
Глава 3. РАЗДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧАСТИ СИГНАЛА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ПУТЕМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ	60
3.1. Численное исследование изменения нестационарного сигнала установки с гальваническим источником в зависимости от азимутального угла измерительной системы.....	60
3.2. Аналитическое обоснование существования оптимальной комбинации углов измерительной системы (на примере поляризующегося полупространства).....	76
3.3. Разработка способов поиска оптимальной конфигурации измерительной системы	84
Способ 1. Изменение азимутального угла при фиксированном разносе	85
Способ 2. Перемещение приемной линии параллельно источнику	85
Способ 3. Изменение угла ψ при фиксированном положении приемника	86
3.4. Разделение поляризационной и электродинамической составляющей нестационарного сигнала выбором оптимальной конфигурации системы (по результатам полевых экспериментов)	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
ЛИТЕРАТУРА	99

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – электромагнитное поле, возбуждаемое линейным гальваническим источником в горизонтально-слоистых средах с низкочастотной дисперсией (НЧД) удельного электрического сопротивления (УЭС) на предмет разделения процессов становления и вызванной поляризации, а также совместной инверсии данных индукционных и гальванических импульсных зондирований.

Актуальность. В настоящее время на стадии поисков и разведки месторождений полезных ископаемых возрастает роль относительно экономичных геофизических методов. В комплексе с сейсморазведкой все чаще применяются несейсмические методы, одним из которых является метод зондирований становлением поля (ЗС). При полевых измерениях используются системы, регистрирующие становление всех компонент электромагнитного поля. Хорошо разработанная теоретическая база, современные аппаратные и вычислительные технологии позволяют определять характеристики сложных геоэлектрических разрезов, решать сложно параметризованные обратные задачи. Вместе с тем, наиболее часто применяемой моделью при интерпретации данных нестационарных (импульсных) зондирований остается модель горизонтально-слоистой изотропной среды. Особенностью же импульсной электроразведки, является то, что процесс становления в большинстве случаев осложнен влиянием вызванной поляризации (ВП). В связи с этим возникает необходимость ее учета при инверсии данных. При описании поляризующейся среды (по сравнению с неполяризующейся) возрастает количество модельных параметров для каждого слоя с двух (ρ, h) до пяти (ρ, h, η, τ, c), так как удельное сопротивление среды становится функцией нескольких переменных. Это, в свою очередь, ведёт к усложнению решения обратной

задачи. В связи с этим возникает необходимость учета вызванной поляризации при инверсии данных геоэлектрики, что делает **актуальной** задачу разделения индукционной и поляризационной части регистрируемого сигнала и **необходимой** разработку соответствующего программно-алгоритмического обеспечения. Решение каждой из поставленных задач приведет к повышению эффективности и информативности электромагнитных нестационарных зондирований.

Цель исследования – повышение качества (надежности, достоверности) определения параметров среды по данным ЗС в поляризующихся геологических средах через разделение поляризационных и индукционных составляющих сигнала путем поиска оптимальной конфигурации измерительной системы, а также разработку программно-алгоритмического обеспечения для совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований в горизонтально-слоистых поляризующихся средах с учетом чувствительности измерительных систем к вызванной поляризации.

Научные задачи исследования

1. Разработать программно-алгоритмическое обеспечение для совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований поляризующихся горизонтально-слоистых сред.

2. Численно определить зависимость измеряемых компонент электромагнитного поля, возбуждаемого гальваническим линейным источником, от геометрических параметров установки при импульсных электромагнитных зондированиях поляризующихся сред и выполнить разделение индукционной и поляризационной части сигнала.

Фактический материал и методы исследования:

Работа основывается на теории квазистационарной электродинамики (уравнения Максвелла в квазистационарном приближении). Основным методом исследования – численное моделирование электромагнитного поля в горизонтально-слоистых поляризующихся средах и сравнительный анализ рассчитанных переходных характеристик для разных моделей. Для учета эффектов вызванной поляризации использовалась частотная зависимость комплексного удельного сопротивления (формула Cole-Cole).

При создании программно-алгоритмического обеспечения для совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований использовались алгоритмы расчета произвольной компоненты поля точечного источника для поляризующейся горизонтально-слоистой среды, их программная реализация <Line_TEMIP> (Антонов Е.Ю., Соколов В.П., Табаровский Л.А., Эпов М.И.) и модифицированный метод нелинейной минимизации Нелдера-Мида. Для тестирования созданного интерпретационного обеспечения использовались синтетические данные, рассчитанные автором, а также данные полевого геофизического эксперимента, полученные на Крестищенском месторождении углеводородов (Харьковская область, Украина) и в Новосибирской области.

Путем сравнительного анализа синтетических сигналов определена чувствительность компонент электромагнитного поля к процессу вызванной поляризации в зависимости от геометрических параметров установки. Фактическим материалом для анализа служили переходные характеристики электромагнитного поля, полученные с использованием средств численного моделирования (<Line_TEMIP>, и созданная диссертантом модификация <Line_TEMIP_Isolines>). При участии соискателя для проверки установленной чувствительности выполнены полевые эксперименты. Измерения проводились на двух объектах: 1) в 10 км от северо-восточной окраины Новосибирска (глиняный карьер); 2) на берегу Обского

водохранилища возле п. Верх-Ирмень, Новосибирской области. Использовались установки: совмещенная петлевая (100×100 м), соосная петлевая (генератор – 100×100 м, приемник – 50×50 м), параллельная гальваническая (питающая линия – 100 м, приемная линия 50 м).

Защищаемые научные результаты

1. Алгоритм и программная реализация совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований поляризующихся геологических сред с учетом чувствительности индукционных и гальванических измерительных систем к вызванной поляризации.

2. Численно установлена зависимость компонент электромагнитного поля от геометрических параметров гальванической системы измерения и выполнено разделение электродинамической и поляризационной части сигнала.

Новизна работы. Личный вклад

1. На основе алгоритма для расчета произвольных компонент поля линейного электрического источника (Эпов М.И., Антонов Е.Ю., 1996) разработано программно-алгоритмическое обеспечение <Line_TEMIP_JI> для поэтапной совместной инверсии данных многокомпонентных импульсных зондирований:

– численно исследована чувствительность компонент электромагнитного поля к параметрам вызванной поляризации, в результате чего установлено, что индукционные и гальванические измерительные системы обладают разной чувствительностью к ВП;

– предложена поэтапная схема (алгоритм) совместной инверсии данных ЗС, в основе которой лежит фактор изменения электромагнитного поля под влиянием вызванной поляризации;

– с использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения и экспериментальных данных (Крестищенское месторождение) построен геоэлектрический разрез, согласующийся с геологическими данными.

2. Средствами численного моделирования (<Line_TEMIP>, <Line_TEMIP_Isolines>) проанализирована чувствительность переходных характеристик к эффекту вызванной поляризации в зависимости от взаимного положения генераторной и приемной линий и предложены оптимальные схемы зондирования:

– выполнена численная имитация и построены карты изолиний электромагнитных полей, в результате анализа которых установлено, что сигналы, измеряемые гальванической установкой, обладают характерной особенностью: на карте изолиний для поздних времен становления поля всегда присутствуют две области, соответствующие положительным и отрицательным значениям сигналов, что подтверждает существование двух типов сигналов – знакопеременных и знакопостоянных (монотонных);

– по результатам численных исследований переходных характеристик сделано принципиально важное заключение о существовании границы раздела знакопеременных и знакопостоянных сигналов, в точках которой (оптимальное положение приемника) сигнал подвержен минимальному влиянию ВП. Наличие такой границы дает возможность разделять электродинамическую и поляризационную составляющие отклика;

– на основе сравнительного анализа изолиний становления электромагнитного поля на дневной поверхности для разных сред предложены способы построения оптимальной зондирующей системы (изменение азимутального угла φ при фиксированном разносе; перемещение приемника параллельно источнику и вращение приемной линии с фиксированным центром приемника).

Теоретическая и практическая значимость результатов

Созданное программно-алгоритмическое обеспечение позволяет проводить как покомпонентную, так и совместную инверсию данных многокомпонентных нестационарных зондирований. Учет разной чувствительности магнитных и электрических компонент электромагнитного поля к процессам вызванной поляризации и совместная инверсия являются эффективным инструментом для повышения качества определения параметров среды по данным импульсной электроразведки.

Численно установленная чувствительность переходных характеристик к эффекту вызванной поляризации в зависимости от геометрических параметров зондирующей системы позволяет сузить область эквивалентных решений обратной задачи, что, в свою очередь, повышает качество определения параметров геоэлектрической модели.

Доказанное с использованием численного моделирования существование оптимальной гальванической измерительной системы позволяет решить задачу пространственного разделения поляризационной и электродинамической составляющей измеряемого сигнала.

Предложенные оптимизированные гальванические зондирующие системы дают возможность получать более информативный полевой материал, что приводит к повышению эффективности нестационарных электромагнитных измерений в поляризующихся средах.

Разработанные способы поиска оптимальной конфигурации зондирующей системы и установленная особенность поля гальванического источника (существование границы раздела знакопеременных и знакопостоянных сигналов, в точках которой сигнал подвержен минимальному влиянию ВП) используются при выполнении экспериментальных исследований на территории Алтайского геодинимического полигона отрядом наземной геоэлектрики ИНГГ СО РАН с 2009 года.

В целом полученные научные результаты повышают эффективность и информативность метода зондирования становлением поля, что позволит, в конечном счете, вывести импульсную электроразведку на более высокий качественный уровень.

Апробация работы

Основные положения и результаты докладывались, обсуждались и были одобрены специалистами на V Международной научно-практической геолого-геофизической конференции-конкурсе молодых ученых и специалистов «Геофизика – 2005» (Санкт-Петербург, 2005), VII Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2006), Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь-2006» (Новосибирск, 2006), Всероссийской конференции аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Рациональное природопользование» (Ярославль, 2006), III Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2006), Научной конференции для студентов, аспирантов, магистрантов и молодых ученых «Трофимуковские чтения - 2006» (Новосибирск, 2006), VIII Уральской молодежной научной школе по геофизике (Пермь, 2007), Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь-2007» (Новосибирск, 2007), IX Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2008), IV Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь-2008» (Новосибирск, 2008), Научной конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Трофимуковские чтения» (Новосибирск, 2008), 19-ом Международном симпозиуме по вопросам исследования Земли электромагнитными методами (Пекин, 2008), X Уральской молодежной научной школе по геофизике (Пермь, 2009), Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь-2009» (Новосибирск - 2009).

Результаты исследований опубликованы в 14 работах: 1 статья в ведущем научном рецензируемом журнале по перечню ВАК «Геология и геофизика» (17 с.), 11 – в материалах международных и российских конференций, 2 – в тезисах международных и российских конференций.

Благодарности

Работа выполнена в Лаборатории геоэлектрики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Автор выражает искреннюю признательность всем сотрудникам Лаборатории электромагнитных полей и Лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН за всестороннюю поддержку на всех этапах работы и создание доброжелательной атмосферы.

Во время работы автором получены полезные советы, ценные замечания и помощь от специалистов в области импульсной электроразведки д.г.-м.н., профессора Н.О.Кожевникова, д.т.н. В.С. Могилатова, д.г.-м.н. Г.М. Морозовой. Автор благодарен за обсуждение и доброжелательную критику к.т.н. Е.В. Балкову, к.ф.-м.н., доценту В.Н. Глинских, к.т.н. Е.В. Павлову, к.г.-м.н. М.А. Павловой, к.т.н. А.Ю. Соболеву, В.С. Игнатову, В.В. Потапову.

Особая благодарность к.г.-м.н. В.В. Оленченко за редактирование диссертации.

Автор также признателен за участие в подготовке диссертации д.т.н., профессору Ю.Н. Антонову, д.т.н. И.Н. Ельцову, к.т.н. А.К. Манштейну, к.т.н. Г.Н. Нестеровой, к.г.-м.н. Н.Н. Неведровой, д.ф.-м.н. В.А. Чеверде, Ю.А. Манштейну.

Необходимо отметить помощь сотрудника НПП ГА «Луч» А.Е. Плотникова при выполнении экспериментальной части работы.

Автор глубоко признателен академику РАН М.И. Эпову за внимательное отношение к вопросам и проблемам автора, без которого подготовка диссертации была бы затруднительна.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту Е.Ю. Антонову за постоянное внимание, всестороннюю поддержку, многочисленные обсуждения и ценные рекомендации.

Автор благодарен В.И. Самойловой за консультации и методические рекомендации по вопросам подготовки диссертации.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 110 страниц текста, 30 рисунков и 18 таблиц. Библиография содержит 96 наименований.

Порядок изложения материалов в диссертации соответствует логике решения поставленных задач:

- ✓ Создание программно-алгоритмического обеспечения для инверсии многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом разной чувствительности индукционных и гальванических измерений
- ✓ Разделение электродинамической и поляризационной составляющей путем поиска оптимальной конфигурации зондирующей системы.

Во Введении обозначена цель работы и ее актуальность. Поставлены научные задачи исследования и приведены защищаемы результаты. Определена новизна, представлен личный вклад автора, практическая и теоретическая ценность работы.

Первая глава посвящена обзору современного состояния способов повышения качества и информативности метода зондирования становлением поля. Обозначены некоторые из возможностей и перспектив в совершенствовании интерпретации данных нестационарных зондирований.

Вторая глава посвящена описанию разработки программно-алгоритмического обеспечения для совместной инверсии многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом разной чувствительности компонент электромагнитного поля к вызванной поляризации. Исследуется чувствительность каждой из компонент электромагнитного поля к параметрам поляризации Cole-Cole. На основе проведенных исследований предлагается поэтапная схема совместной инверсии данных ЗС, которая тестируется на синтетических и экспериментальных данных.

В третьей главе средствами численного моделирования исследуется чувствительность переходных характеристик к эффекту вызванной поляризации в зависимости от взаимного положения генераторной и приемной линий. Анализируются переходные характеристики и изолинии поля на дневной поверхности с целью выявления точек ослабленного влияния ВП на сигнал. Показано, что выбором оптимальной системы измерения можно выделить электродинамическую составляющую сигнала. Теоретические результаты заверены полевыми экспериментами.

Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Электроразведка с начала XX века прочно заняла свое место, как при геофизических исследованиях строения Земли, так и при поиске и разведке полезных ископаемых. Первыми в области электромагнитных методов можно считать работы К. Зундберга, Н. Лундберга, Е.Н. Рагозина, С.С. Стефанеску, К. Шлюмберже, относящиеся к началу прошлого столетия [Хмелевской и Бондаренко, 1989]. С тех пор геоэлектрика получила широкое развитие, а одним из наиболее популярных и востребованных методов наземной геоэлектрики в структурной и поисковой геофизике, наряду с вертикальными электрическими и частотными зондированиями, являются методы нестационарных (импульсных) электромагнитных зондирований.

Основы применения устанавливаемых полей в электроразведке изложены в классических теоретических работах Л.Л. Ваньяна, А.Н. Тихонова, С.М. Шейнмана, Ю.В. Якубовского, G.V. Keller, J.R. Wait и других российских и зарубежных ученых. Развитию этого направления способствовали успехи применения зондирования становлением поля (ЗС) в нефтяной геофизике. Дальнейшей разработке теории и методики ЗС посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей, среди которых Г.А. Исаев, Ф.М. Каменецкий, А.А. Кауфман, Г.М. Морозова, Б.И. Рабинович, В.А. Сидоров, В.В. Тикшаев, L. Buselli, T. Lee, K. Vozoff, P. Weidelt и многие другие. Первые автоматизированные интерпретационные системы разрабатывали Ю.А. Дашевский, И.Н. Ельцов, В.С. Могилатов, Л.А. Табаровский, Г.М. Тригубович, М.И. Эпов, С.Н. Stoyer и др.

Такое бурное развитие теории и практики применения метода ЗС, вместе с интенсивным ростом аппаратных и вычислительных

возможностей, позволило перейти к площадным и многокомпонентным наблюдениям и их эффективной обработке. Одно из первых подобных измерений в комплексе с сейсмическими исследованиями провели немецкие геофизики (западная Германия, 1986 г.). Использовалась, система многокомпонентных нестационарных зондирований с закрепленным гальваническим источником – LOTEM (Long-Offset Electromagnetic Method), автор которой К.-М. Strack. Все это открывало хорошие перспективы для решения широкого круга геолого-геофизических.

Теоретическую основу метода составляют прямые задачи для интерпретационных моделей, среди которых наиболее часто применяемая при интерпретации электромагнитных данных – это модель одномерной горизонтально-слоистой изотропной среды (рис. 1.1). В данном случае параметризация определяется двумя характеристиками: ρ – сопротивление и h – мощность слоя.

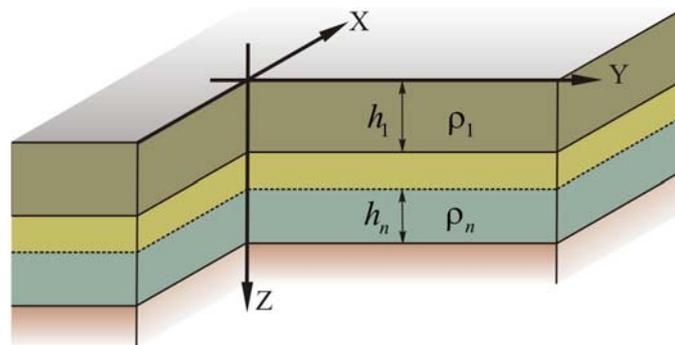


Рис. 1.1. Модель горизонтально-слоистой изотропной среды.

Однако, по мере развития экспериментальной базы и совершенствования аппаратуры стали появляться данные, не поддающиеся интерпретации в рамках модели простой проводящей среды. В 60-70-е годы в России В.А. Сидоровым, А.Д. Скурихиным и за рубежом Н.Ф. Morrison, R.K. Spies зарегистрировали аномально затухающие процессы становления: медленное затухание, немонотонность и сигналы со сменой знака, как однократной, так и многократной. Одним из возможных объяснений возникновения таких переходных процессов может быть то, что в сигнале

содержится составляющая, обусловленная вызванной поляризацией (ВП) горных пород. В 1974 году Р.Б. Журавлева и И.Э. Гаврилова, а также Т. Lee и ряд других исследователей теоретически обосновали становление поля со сменой знака над поляризующимися объектами для индукционных установок (источник и приемник – токовая петля). Сегодня идея влияния ВП на регистрируемый сигнал ЗС является достаточно разработанной и принимается большинством специалистов, а в практике математического моделирования процессов вызванной поляризации возобладал феноменологический подход, основанный на решении краевых задач для уравнений Максвелла с частотно-зависимыми электромагнитными параметрами среды. При описании низкочастотной дисперсии (НЧД) удельного сопротивления наиболее часто применяется формула Cole-Cole [Pelton et al., 1978], имеющая вид:

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

здесь η - стационарная поляризуемость, ρ_0 - удельные сопротивления среды на постоянном токе, τ - время релаксации, c - параметр частотной зависимости.

Тем не менее, до настоящего времени все еще остается много вопросов, касающихся природы аномальных откликов при нестационарных электромагнитных зондированиях. Это обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования теории нестационарных зондирований, развитие модельной базы исследований, как в направлении 2D и 3D моделирования, так и учёта внутреннего сложного строения горизонтально-слоистых сред (анизотропия, магнитная вязкость и вызванная поляризация и др.). Однако такой подход усложняет основную проблему, стоящую перед геофизиками, – решение обратной задачи, так как количество параметров,

определяющих прямую задачу, возрастает. В случае слоистой интерпретационной модели для поляризующейся среды по сравнению с неполяризующейся средой количество параметров возрастает для каждого слоя с двух (ρ, h) до пяти (ρ, η, τ, c, h) , ввиду того, что удельное сопротивление среды становится функцией нескольких переменных.

Следует помнить, что все математические модели, не противоречащие наблюдениям, называют эквивалентными. Источником эквивалентности могут быть свойства как модели, так и свойства экспериментальных данных. В соответствии с этим рассматривают 2 типа эквивалентности: модельно и экспериментально обусловленную [Табаровский и др., 1985]. Настоящая работа посвящена способам сужения экспериментально обусловленной эквивалентности.

Повышению устойчивости решения обратной задачи (инверсии) и соответственно качества интерпретации данных наземной электроразведки посвящены работы многих специалистов. В основном область эквивалентности решений обратной задачи сужается уменьшением погрешностей наблюдения за счет накопления сигналов и высокой степени дискретизации, что в настоящее время является необходимым условием при создании регистрирующей аппаратуры. Регуляризация решения посредством введения дополнительной геолого-геофизической информации по изучаемому району (опорное бурение, ГИС и т.д.) является еще одним общепризнанным способом повышения устойчивости инверсии.

В последнее время заметной тенденцией при геоэлектрических исследованиях и последующей обработке является комплексирование методов электроразведки, что также позволяет сузить область эквивалентности решений обратной задачи. Так, G. Buselli и Kanglin Lu, используя различные методы электроразведки (ЗС, ВП, ВЭЗ и др.) показывают, что комплексирование повышает качество определения искомых параметров [Buselli et. al., 2001]. Другие исследователи в ряде работ

[Tezkan et. al., 1996, 1999; Narinarayana, 1999; Манштейн и др., 2006] на различных объектах (свалках бытовых и промышленных отходов, археологических объектах, геотермальных источниках и др.) показывают эффективность комплексов электромагнитных методов. Обработка и интерпретация таких измерений позволяет скорректировать границы объектов, определить их неоднородности и вертикальные границы, что практически невозможно реализовать при использовании каждого метода индивидуально.

Нельзя не упомянуть комплексирование глубинных (магнитотеллурических зондирований) и малоглубинных (зондирования становлением поля) методов электроразведки, которое широко применяется в России и за рубежом. Такой способ исследования дает возможность не только повысить качество интерпретации электроразведки, но и позволяет проводить литологическое расчленение геологического разреза от первых сотен метров до глубин нескольких десятков километров с хорошей детальностью. Успешное применение такого комплекса можно найти в работах [Meju, 1996; Nordt, 2000; Кондратьев и др., 2004] и многих других.

Не редкостью стало привлечение данных других геофизических методов (сейсморазведки, гравиразведки, магниторазведки и др.) для получения более точной геоэлектрической информации. В частности в работе [Strack et. al., 1990] данные сейсморазведки используются в качестве априорной информации. Для интерпретации данных глубинных зондирований становлением поля (LOTEM) были взяты опорные сейсмические горизонты. В результате построен геоэлектрический разрез, где зоны повышенного сопротивления совпадают с областями пониженных скоростей.

Многомерное моделирование, обусловленное все возрастающими вычислительными возможностями, позволяет оперировать объемными моделями изучаемых объектов. В настоящее время развитие вычислительных

алгоритмов для решения задач со сложно построенными средами получило широкое распространение во всех методах электроразведки. В частности, в ЧЗ развитию многомерного моделирования способствовали работы Табаровского Л.Б., Эпова М.И., Goldman M. и др., в МТЗ – Keller G.V., Бердичевского М.Н., Спичака В.В. и др. Развитию теории нестационарных зондирований в данном направлении посвящены работы многих авторов. Одними из первых в середине 80-х годов прошлого века добились успеха Newman G.A., Anderson W.L. и Hohmann G.W. Исследователи показали, что решение многомерной обратной задачи нестационарных зондирований позволяет получить более достоверную информацию об исследуемом объекте по сравнению с интерпретацией, в основе которой лежит одномерное моделирование геоэлектрической среды в случае совмещенной петлевой установки. [Commer, 2003]. Многомерное численное моделирование активно развивается многими российскими и зарубежными учеными: П.С. Мартышко, М.Г. Персова, А.Н. Ратушняк, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович, О.А. Хачай, Э.П. Шурина, K. Spitzer, К.-М. Strack, Zhdanov M.S. и др.

Следующим этапом в развитии вычислительных алгоритмов, можно считать многомерное моделирование с учетом различных процессов – ВП, суперпарамагнетизма, анизотропии и т.д. Такие работы обычно носят теоретический характер [El-Kaliouby et al., 2004; Кожевников и др., 2008; Долгун и др., 2009]. Оперирование такими сложными моделями, с одной стороны, дает возможность интерпретировать кривые ранее неподдававшиеся инверсии, с другой стороны, область эквивалентности решений обратной задачи существенно расширяется (возрастает неустойчивость). Высокая неустойчивость решения обратной задачи является одной из причин того, почему до сих пор основной интерпретационной моделью при решении задач становления является горизонтально-слоистая изотропная модель. В рамках такой модели аномальные кривые становления,

благодаря работам В.П. Губатенко, В.В. Кормильцева, Б.С. Светова, В.В. Тикшаева, С.М. Шейнмана, R.S. Smith, P. Weidelt, G.F. West и других российских и зарубежных ученых, принято считать искаженными процессами поляризации.

Сегодня в рамках горизонтально-слоистой поляризующейся модели одна из немногих возможностей повышения качества определения искомых параметров по данным ЗС – это разделение процессов становления и вызванной поляризации. Влияние поляризующихся объектов на характеристики становления поля рассмотрены в работах [Pelton et al., 1978; Кормильцев, 1980; Flis et al., 1989; Губатенко, 1994; El-Kaliouby et al., 1997] и др. Какой-либо общепринятой концепции для выделения поляризационной составляющей сигнала ЗС нет, однако исследования по этой теме проводились [Каменецкий и др, 1984; Задорожная и др., 1998; Descloitres et al., 2000]. Авторы таких работ обычно ограничиваются соображениями общего характера. Большинство из этих исследований относится к измерениям установками с источником индукционного типа. Что же касается гальванических установок, то таких работ крайне мало [Светов, 1992; Агеев и др., 1999], в том числе работы, связанные с изучением влияния ВП на данные регистрируемые установкой LOTEM [Hoheisel et al., 2004].

На практике в настоящее время основным способом разделения процессов становления и вызванной поляризации является использование установок с разными геометрическими характеристиками (конфигурирование) [Каменецкий и др, 1990; Жандалинов, 2005], что позволяет усилить или ослабить влияние ВП. Для гальванических установок успешно реализована технология, получившая название дифференциально-нормированного метода электроразведки (ДНМЭ), основанная на том, что в поздней стадии процесса становления отклик от неполяризующейся проводящей слоистой среды не зависит от разноса. Это позволяет, начиная с некоторого момента времени, выделить поляризационную составляющую

сигнала, которая в данном случае является полезной (метод ВП). Работ, посвященных данному направлению можно найти достаточно много [Рыхлинский и др., 1970; Легейдо и др., 1990, 1995, 1997; Caglar, 2000; Routh et al., 2001; Xiang et al., 2002; Мандельбаум и др., 2002] и др.

Таким образом, на современном этапе развития геоэлектрики основными способами повышения качества интерпретации данных электромагнитных измерений являются:

- снижение погрешностей наблюдений;
- использование априорной геолого-геофизической информации;
- комплексирование данных электроразведочных и других методов;
- развитие теории (многомерное численное моделирование, новая параметризация и т.д.);
- конфигурирование измерительных систем.

Эффективными способами являются комплексирование данных геофизических методов и использование априорной информации. Не менее важна совместная инверсия данных многокомпонентных нестационарных зондирований, учитывающая разную чувствительность индукционных и гальванических измерительных систем к эффектам вызванной поляризации. Автору известны лишь работы, посвященные совместной инверсии данных ЗС без учета ВП либо для комплекса методов: [Raiche et al., 1985; Das, 1995; Zhang et al., 2000; Meju, 2005; Scholl, 2005] и др.

Другим способом повышения качества интерпретации данных импульсной электроразведки является выбор оптимальной геометрии измерительной системы. Эти исследования сегодня ориентированы либо на выделение составляющей переходной характеристики, обусловленной поляризующимися объектами, либо, наоборот, на подавление влияния ВП. При условии существования адекватной петрофизической модели, пять

параметров, определяющих решение прямой задачи (ρ, η, τ, c, h) , дают больше возможностей для геологической интерпретации, чем два (ρ, h) . Исследования, направленные на более точное определение параметров поляризующейся геоэлектрической модели путем конфигурирования измерительной системы, позволят не только повысить качество инверсии данных ЗС, но и увеличить общую информативность импульсной электроразведки.

Глава 2. СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С УЧЕТОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ К ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Применение многомерных интерпретационных моделей, несомненно, ведет к более глубокому пониманию распространения электромагнитного сигнала в земной толще. Тем не менее, использование горизонтально-слоистых поляризующихся моделей и исследование влияния ВП на результаты электромагнитных измерений остается весьма актуальным, но недостаточно изученным.

Современное программно-алгоритмическое обеспечение позволяет оценить количественное и качественное влияние поляризации среды на измеряемый электромагнитный сигнал и создать инструментарий для совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом сделанных оценок, что повысит информативность метода зондирования становлением поля и качество интерпретации.

2.1. Решение прямой задачи электродинамики о поле произвольного источника в горизонтально-слоистой изотропной среде (теоретическое обоснование)

Под произвольным источником здесь и далее будем понимать класс дипольных источников с произвольно ориентированным моментом.

Известно, что горизонтально-слоистая модель среды – это совокупность разделенных плоско-параллельными границами пластов, в пределах каждого из которых проводимость $\sigma_1, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_N$ и магнитная проницаемость $\mu_1, \dots, \mu_i, \dots, \mu_N$ постоянны. Координаты плоских границ $\gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_N$ в декартовой системе координат XYZ (рис. 2.1) – $z_1, \dots, z_i, \dots, z_N$.

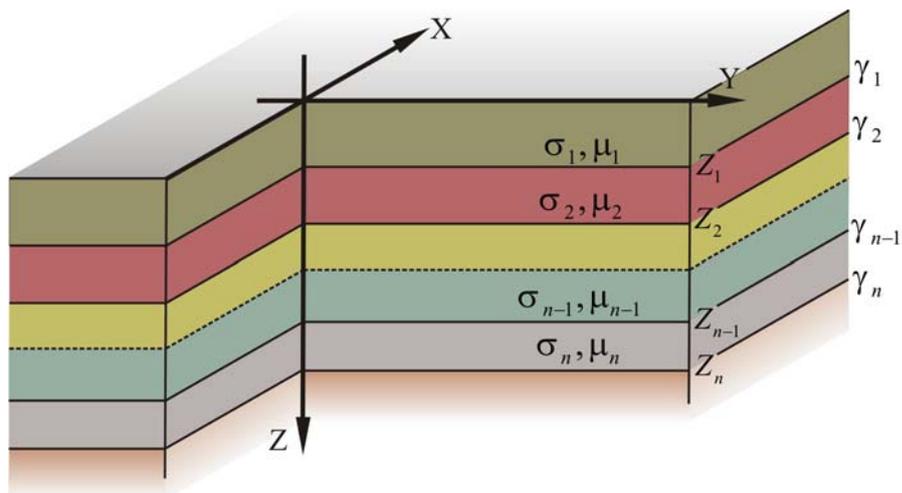


Рис. 2.1. Модель горизонтально-слоистой изотропной среды.

Классический вид уравнений Максвелла в j -ом слое, представленной модели не содержащем сторонних токов, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} & \mathbf{j} &= \sigma_j \mathbf{E} \\
 \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\
 \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 & \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\
 \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho
 \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{B}, \mathbf{H} – векторы магнитного поля, \mathbf{D}, \mathbf{E} – векторы электрического поля; плотность свободных электрических зарядов ρ равна нулю вследствие отсутствия объемных зарядов; \mathbf{j} – плотность токов проводимости.

Рассмотрим квазистационарное приближение для области, не содержащей сторонние источники, то есть в первом уравнении Максвелла пренебрегаем токами смещения:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \sigma_j \mathbf{E} \\
 \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu_j \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \\
 \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0 \\
 \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0
 \end{aligned}$$

Выбором временной зависимости в виде $e^{-i\omega t}$ определяется прямое и обратное преобразование Фурье для перехода из временной области в частотную:

$$g^+(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-i\omega t} dt,$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g^+(\omega) e^{i\omega t} d\omega.$$

В частотной области система уравнений Максвелла в j -ом слое, в отсутствие сторонних источников, записывается в виде:

$$\text{rot } \mathbf{H}^+ = \sigma_j \mathbf{E}^+, \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E}^+ = i\omega \mu_j \mathbf{H}^+, \quad (2.2)$$

$$\text{div } \mathbf{H}^+ = 0, \quad (2.3)$$

$$\text{div } \mathbf{E}^+ = 0. \quad (2.4)$$

Выпишем z -компоненты уравнений (2.1), (2.2) и соотношения (2.3), (2.4) для слоя с номером j :

$$\frac{\partial H_y^+}{\partial x} - \frac{\partial H_x^+}{\partial y} = \sigma_j E_z^+, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial E_y^+}{\partial x} - \frac{\partial E_x^+}{\partial y} = i\omega \mu_j H_z^+, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial H_x^+}{\partial x} + \frac{\partial H_y^+}{\partial y} = -\frac{\partial H_z^+}{\partial z}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial E_x^+}{\partial x} + \frac{\partial E_y^+}{\partial y} = -\frac{\partial E_z^+}{\partial z}. \quad (2.8)$$

Прямое и обратное двумерное преобразования Фурье функции $f(x, y, z)$ по пространственным координатам плоскости XU задаются выражениями:

$$f^*(\xi, \eta, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) e^{-i\xi x - i\eta y} dx dy, \quad (2.9)$$

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\xi, \eta, z) e^{i\xi x + i\eta y} d\xi d\eta. \quad (2.10)$$

Применяя преобразование (2.9) к системе (2.5) – (2.8), получаем:

$$\begin{cases} -i\eta H_x^* + i\xi H_y^* = \sigma_j E_z^* \\ i\xi H_x^* + i\eta H_y^* = -\frac{\partial H_z^*}{\partial z} \end{cases},$$

$$\begin{cases} -i\eta E_x^* + i\xi E_y^* = i\omega\mu_j H_z^* \\ i\xi E_x^* + i\eta E_y^* = -\frac{\partial E_z^*}{\partial z} \end{cases}.$$

Тогда:

$$H_x^* = \frac{i\eta}{\tau^2} \sigma_j E_z^* + \frac{i\xi}{\tau^2} \frac{\partial H_z^*}{\partial z}, \quad (2.11)$$

$$H_y^* = -\frac{i\xi}{\tau^2} \sigma_j E_z^* + \frac{i\eta}{\tau^2} \frac{\partial H_z^*}{\partial z}, \quad (2.12)$$

$$E_x^* = \frac{i\xi}{\tau^2} \frac{\partial E_z^*}{\partial z} E_z^* + \frac{i\eta}{\tau^2} i\omega\mu_j H_z^*, \quad (2.13)$$

$$E_y^* = \frac{i\eta}{\tau^2} \frac{\partial E_z^*}{\partial z} E_z^* - \frac{i\xi}{\tau^2} i\omega\mu_j H_z^*, \quad (2.14)$$

где $\tau^2 = \xi^2 + \eta^2$.

Таким образом, для определения искомой компоненты электромагнитного поля в горизонтально-слоистой среде достаточно определить пространственные Фурье-образы его вертикальных компонент E_z^*, H_z^* . Далее для краткости записи значок «*» будет опускаться.

Задачи для нахождения E_z, H_z состоит в следующем: из условия непрерывности H_x, H_y на горизонтальных границах $\gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_N$ (рис. 2.1) и соотношения (2.5) следует непрерывность вертикальной составляющей плотности тока. Учитывая также непрерывность E_x, E_y , соотношения (2.7) – (2.8), получим систему граничных условий:

$$\left[\sigma E_z \right]_{z=z_j} = \sigma_{j+1} E_z \Big|_{z=z_j+0} - \sigma_j E_z \Big|_{z=z_j-0} = 0, (j=1, \dots, N), \quad (2.15)$$

$$\left[\frac{\partial E_z}{\partial z} \right]_{z=z_j} = \frac{\partial E_z}{\partial z} \Big|_{z=z_j+0} - \frac{\partial E_z}{\partial z} \Big|_{z=z_j-0} = 0, (j=1, \dots, N), \quad (2.16)$$

$$\left[\mu H_z \right]_{z=z_j} = \mu_{j+1} H_z \Big|_{z=z_j+0} - \mu_j H_z \Big|_{z=z_j-0} = 0, (j=1, \dots, N), \quad (2.17)$$

$$\left[\frac{\partial H_z}{\partial z} \right]_{z=z_j} = \frac{\partial H_z}{\partial z} \Big|_{z=z_j+0} - \frac{\partial H_z}{\partial z} \Big|_{z=z_j-0} = 0, (j=1, \dots, N). \quad (2.18)$$

Функции E_z, H_z удовлетворяют в каждом слое, не содержащем источников, однородному уравнению Гельмгольца:

$$\Delta F - k_j^2 F = 0$$

и условию на бесконечности:

$$\{ F \rightarrow 0, (x, y, z) \rightarrow \pm\infty \},$$

где $k_j^2 = -i\omega\mu_j\sigma_j$ – волновое число, $F = E_z, H_z$.

Для области содержащей сторонние источники, решение представляется в виде суммы: $\mathbf{E} = \mathbf{E}^0 + \mathbf{E}^a$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}^0 + \mathbf{H}^a$, где функции $\mathbf{E}^0, \mathbf{H}^0$ являются полями источников в однородной среде с параметрами соответствующего слоя, а функции $\mathbf{E}^a, \mathbf{H}^a$ удовлетворяют однородному уравнению Гельмгольца.

Таким образом, решая поставленную краевую задачу, можно получить выражение для произвольной компоненты ЭМ поля произвольного дипольного гармонического источника в горизонтально-слоистой среде. Подробное описание построения выражений всех компонент полей электрических I_x, I_y, I_z и магнитных M_x, M_y, M_z источников изложено в работах Л.А. Табаровского (1975), Л.А. Табаровского и В.П. Соколова (1982) и имеет следующую компактную форму записи:

$${}^V F_m^s = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \left[\left({}^V \Gamma_F \right)_m^s {}_E f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0) + \left({}^V \Gamma_F \right)_m^s {}_H f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0) \right] d\tau. \quad (2.19)$$

Здесь индекс $V \in \{I_x, I_y, I_z, M_x, M_y, M_z\}$ указывает на тип источника (в нашем случае это будет электрический (I_α)). Индексы s, m определяют положения источника и точки измерения, соответственно. Функции ${}_E f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0)$ и ${}_H f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0)$ зависят от ЭМ свойств среды и взаимного расположения источника и точки измерения на вертикальной оси z . Дифференциальные операторы $\left({}^V \Gamma_F \right)_m^s, \left({}^V \Gamma_F \right)_m^s$ определяют зависимость от типа источника, измеряемой компоненты и взаимного расположения источника и точки измерения в горизонтальной плоскости.

Различные аспекты построения и вычисления функций ${}_E f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0)$ и ${}_H f_m^s(\lambda, \omega, z, z_0)$ с помощью рекуррентных соотношений неоднократно

рассматривались в научной литературе. При построении вычислительных процедур использовались, с небольшими изменениями, рекуррентные формулы, приведенные в Л.А. Табаровского (1975), Л.А. Табаровского и В.П. Соколова (1982).

Функции $\left({}_E^V \Gamma_F\right)_m^s, \left({}_H^V \Gamma_F\right)_m^s$, не зависят от ЭМ параметров модели.

Интегралы, входящие в состав выражения (2.19), таковы, что в общем виде представляются выражением:

$$I_{r,\nu} = \int_0^{\infty} F(\lambda) e^{-2\lambda} J_{\nu}(\lambda r) d\lambda, \quad \nu = 0, 1, 2.$$

Наличие под интегралом затухающей экспоненты и ограниченность $F(\lambda)$ и $J_{\nu}(\lambda r)$ позволяют перейти к интегрированию на интервале $[0, B]$ с конечным верхним пределом. При определении такого интервала и интерполировании функции $F(\lambda)$ сплайн-полиномами получается выражение следующего вида:

$$F(\lambda) = \sum_{k=0}^{N+1} F_k P_k(\lambda).$$

Тогда вычисление интеграла $I_{r,\nu}$ сведется к расчету выражения:

$$\int_0^B \left[\sum_{k=0}^{N+1} F_k P_k(\lambda) \right] e^{-2\lambda} J_{\nu}(\lambda r) d\lambda = \sum_{k=0}^{N+1} F_k A_k,$$

где $A_k = \int_0^B P_k(\lambda) e^{-2\lambda} J_{\nu}(\lambda r) d\lambda$ - сплайновые интерполяционные квадратурные

коэффициенты, которые рассчитываются для множества разносов однократно и сохраняются для дальнейшего использования [Эпов и др. 1990].

2.2. Численное моделирование электромагнитного сигнала в поляризующейся горизонтально-слоистой среде (с использованием формулы Cole-Cole)

Нестационарные электромагнитные поля нередко содержат в отклике составляющую, обусловленную эффектом вызванной поляризации (ВП) среды, что в особенности проявляется для установок зондирования гальванического типа. Сегодня это утверждение не вызывает никаких сомнений и подтверждено многочисленными полевыми экспериментами. Известно, что вызванная поляризация – это процесс сложной природы, которое зависит от большого количества факторов физического и физико-химического происхождения, возникающих при прохождении через среду электрического тока.

Теория вызванной поляризации объединяет большое количество частных моделей, описывающих процесс на микро- и макро- уровнях. Физико-химические основы теории позволили рассмотреть в качестве механизма возникновения ВП на микроскопическом уровне процессы переноса и взаимодействия зарядов на границах фаз гетерогенной среды (на основе ячеек Постельникова-Фридрихсберга). Основополагающей в данном направлении была работа [Постельников, 1964]. Другая не менее важная модель, которую необходимо отметить, – модель периодически-слоистой среды с чередующимися проводящими и высокоомными тонкими пропластками (емкостной эффект Максвелла-Вагнера), [Губатенко, 1991]. Одним из последних способов учета ВП является модель с использованием свойств поровых геологических сред [Zadorozhnaya, 2008]. В развитии теории ВП участвовали как российские [Геннадиник, 1967; Шейнманн, 1969; Комаров, 1972; Куликов, Шемякин, 1978; Кормильцев, 1980; Светов, 1992, Светов и др., 1996; Агеев, Светов, 1999] так и зарубежные ученые [Madden, Marshall, 1959; Wait, 1984] и др.

Способов формального учёта вызванной поляризации может быть много, так как разнообразны причины, порождающие данный процесс, и эти способы достаточно сложны. В практике математического моделирования процессов вызванной поляризации возобладал феноменологический подход, основанный на решении краевых задач для уравнений Максвелла с частотно-зависимыми электромагнитными параметрами среды. Выбранная в первой главе схема расчета электромагнитного поля, позволяет использовать приведенную схему учета ВП. В решение электродинамической гармонической задачи вводится комплексная функция $\rho(\omega)$ или $\sigma(\omega)$, которой описывается частотная дисперсия удельного сопротивления или электропроводности соответственно. Из множества известных на сегодня соотношений [Dias, 2000] наиболее применяемым для этого, а также удовлетворяющим большинству экспериментальных дисперсионных зависимостей, является формула Cole-Cole. Для комплексного удельного сопротивления [Pelton et al., 1978] и электропроводности [T.Lee, 1981] она имеет вид:

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

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где индексы 0 и ∞ использованы для обозначения удельного сопротивления или проводимости, соответственно, на постоянном токе и предельно высоких частотах, $\eta = \frac{\sigma_\infty - \sigma_0}{\sigma_\infty} = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0}$ – стационарная поляризуемость, τ – время релаксации, c – параметр частотной зависимости.

Итак, из формулы Cole-Cole видно, что описание ВП характеризуется величинами η, τ, c . Параметр η характеризует интенсивность поляризации и определяет убывающий характер амплитудно-частотной характеристики функции $\rho(\omega)$ с ростом частоты. Параметр τ имеет размерность времени и соответствует периоду затухания процесса поляризации, а его увеличение приводит к смещению максимума фазово-частотной характеристики (ФЧХ) в область низких частот. При переходе в частотную область по параметру τ определяется значение частоты ω , ниже которого начинает проявляться дисперсия удельного сопротивления. Параметр частотной зависимости c , главным образом, характеризует распределение частиц, что существенно с точки зрения диагностики и идентификации разных источников вызванной поляризации (исследование размеров вкрапленных частиц, их распределений в поляризуемом объекте, исследование концентрации вкрапленников во вмещающей среде и т.д.). Возрастание параметра c делает спад ФЧХ более резким, при стремлении ω к предельным значениям [Pelton, 1978].

Параметры поляризации, как и сам процесс, зависят от большого количества факторов физического и физико-химического происхождения, поэтому их значения изменяются в очень широком диапазоне. По данным полевых наблюдений, проведенных многими исследователями, изучавшими эффект вызванной поляризации, характерные времена релаксации вызванной поляризации τ могут изменяться в диапазоне от 10^{-5} до 10^4 сек [Pelton et al., 1978; Молчанов, Сидоров, 1985]. Теоретические исследования других процессов и лабораторно-экспериментальные измерения на образцах свидетельствуют о том, что в подавляющем большинстве случаев параметр c изменяется в интервале 0.3–0.6. Такие параметры (в частности, $c = 0.5$) соответствуют описанию поляризационных процессов в двухфазных (пористых) средах с диффузным распределением зарядов в жидкой фазе (растворе электролита). По-видимому, значение параметра c связано прежде

всего с типом физико-химического поляризованного процесса и условиями его протекания в горных породах. [Агеев, Светов, 1999].

Однако даже для самых простых моделей с частотно-зависимыми параметрами (однородная среда, полупространство) не существует аналитических выражений переходных характеристик, что, несомненно, является особенностью математического моделирования устанавливаемых полей в поляризующихся средах. В таком случае все решения приходится получать с помощью численных методов. В связи с этим можно сказать о появлении (в последней трети прошлого века) специфической области вычислений: математического моделирования электромагнитных полей для сред с комплексными частотно-зависимыми параметрами сопротивления, магнитной и/или диэлектрической проницаемостями.

Особенности моделирования выражаются также в необходимости максимального учёта основных параметров измерительных систем и продолжительности импульса. Но этот аспект не будет рассмотрен в данной работе. Автору известен этот факт, и более того, на эту тему проводились исследования с его непосредственным участием [Антонов, Шеин, 2008]. Такая позиция обусловлена, во-первых, тем, что будут рассматриваться в основном установки с разнесами, позволяющими использовать дипольные приближения при расчетах. Во-вторых, учет размеров установки и длительности импульса не приводит к качественному изменению картины электромагнитного поля, что автоматически делает предположения и выводы, сделанные для дипольных приближений, верными и для установок, где размером и конфигурацией элементов системы пренебрегать нельзя.

Таким образом, имеется одномерный математический аппарат, с помощью которого можно построить алгоритм для расчета установившегося поля произвольного источника на дневной поверхности. Это позволяет перейти непосредственно к моделированию и исследованию нестационарного электромагнитного сигнала над поляризующимися средами.

2.3. Исследование чувствительности компонент электромагнитного поля к параметрам поляризации Cole-Cole путем сравнительного анализа синтетических сигналов

Поведение нестационарного сигнала, генерируемого гальваническим источником, в зависимости от параметров поляризации Cole-Cole, качественно можно проследить, исследуя становление электромагнитного поля над поляризуемым полупространством. Еще раз в этом можно убедиться, проведя сравнительный анализ сигналов над полупространством и над горизонтально-слоистыми средами разных типов. Заложённая в ИНГГ СО РАН идеология автоматизированной интерпретации электромагнитных зондирований [М.И. Эпов и др. 1990] и программная реализация прямых задач для горизонтально-слоистой поляризуемой среды <Line_TEMIP> (Эпов М.И., Антонов Е.Ю., 1996) позволили создать программу <Line_TEMIP_JI>, которая имитирует становление каждой из измеряемых компонент.

С помощью названной программы <Line_TEMIP_JI>, исследована чувствительность компонент нестационарного электромагнитного поля к изменению параметров поляризации. Анализ проводился для однородного полупространства, модель которого представляет собой границу раздела, ниже которой расположена однородная проводящая среда, а выше – «воздух», непроводящая среда. Такую границу называют дневной поверхностью Земли. При численном эксперименте использовались параметры и конфигурация, характерные для системы многокомпонентных нестационарных зондирований LOTEM [Strack, 1992]: источник в виде заземленной линии и приемники – две линии и индукционные датчики, позволяющие регистрировать компоненты электрического поля (E_x, E_y) и полного вектора производных магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$ (рис. 2.2а).

Кривые становления рассчитывались для среды с удельным

электрическим сопротивлением $80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и различных параметров поляризации. Для имитации использовался один из наиболее распространенных на практике экваториальный тип установки – питающий (AB) и приемный (MN) диполи перпендикулярны к радиусу между их центрами (рис. 2.2б). Параметры измерительной системы выбирались исходя из характерных размеров LOTEM: 2000 м – длина питающей линии AB, 2500 м^2 – эффективная площадь приемной петли, 200 м – длина приемной линии MN, 3000 м – разнос, центр диполя AB совпадает с центром координат, а момент направлен по оси OX.

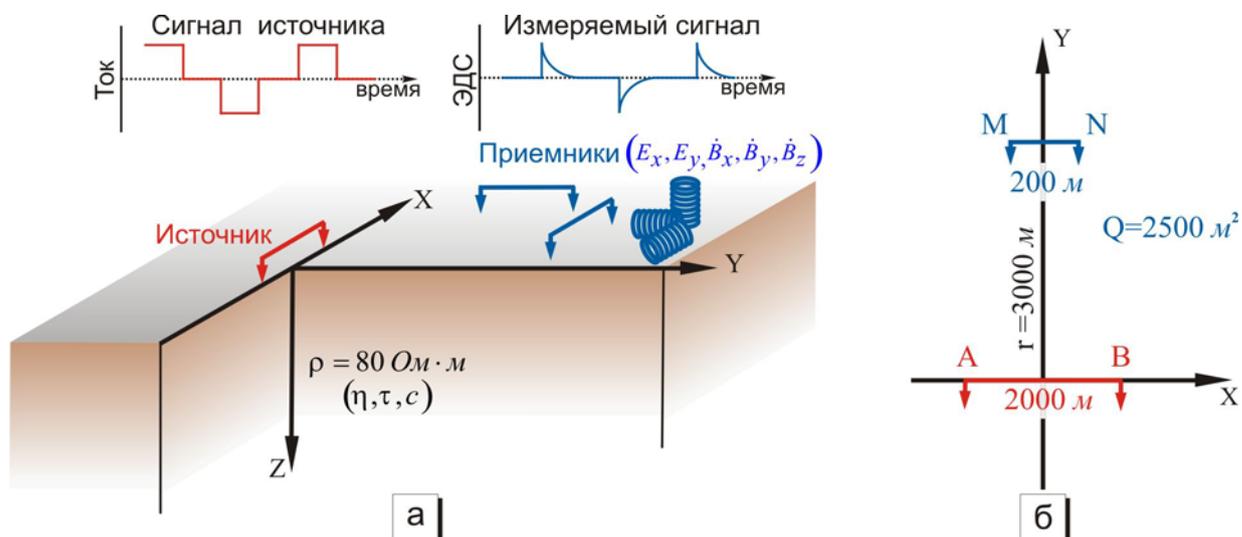


Рис. 2.2. Схематичное представление системы измерения.
 а – геозлектрическая модель и система измерений;
 б – схема установки экваториального типа.

Электрические компоненты

Для оценки чувствительности электрических компонент E_x, E_y при гальваническом возбуждении среды к изменению параметров поляризации были выполнены численные расчеты переходных характеристик и их сравнительный анализ (рис. 2.3).

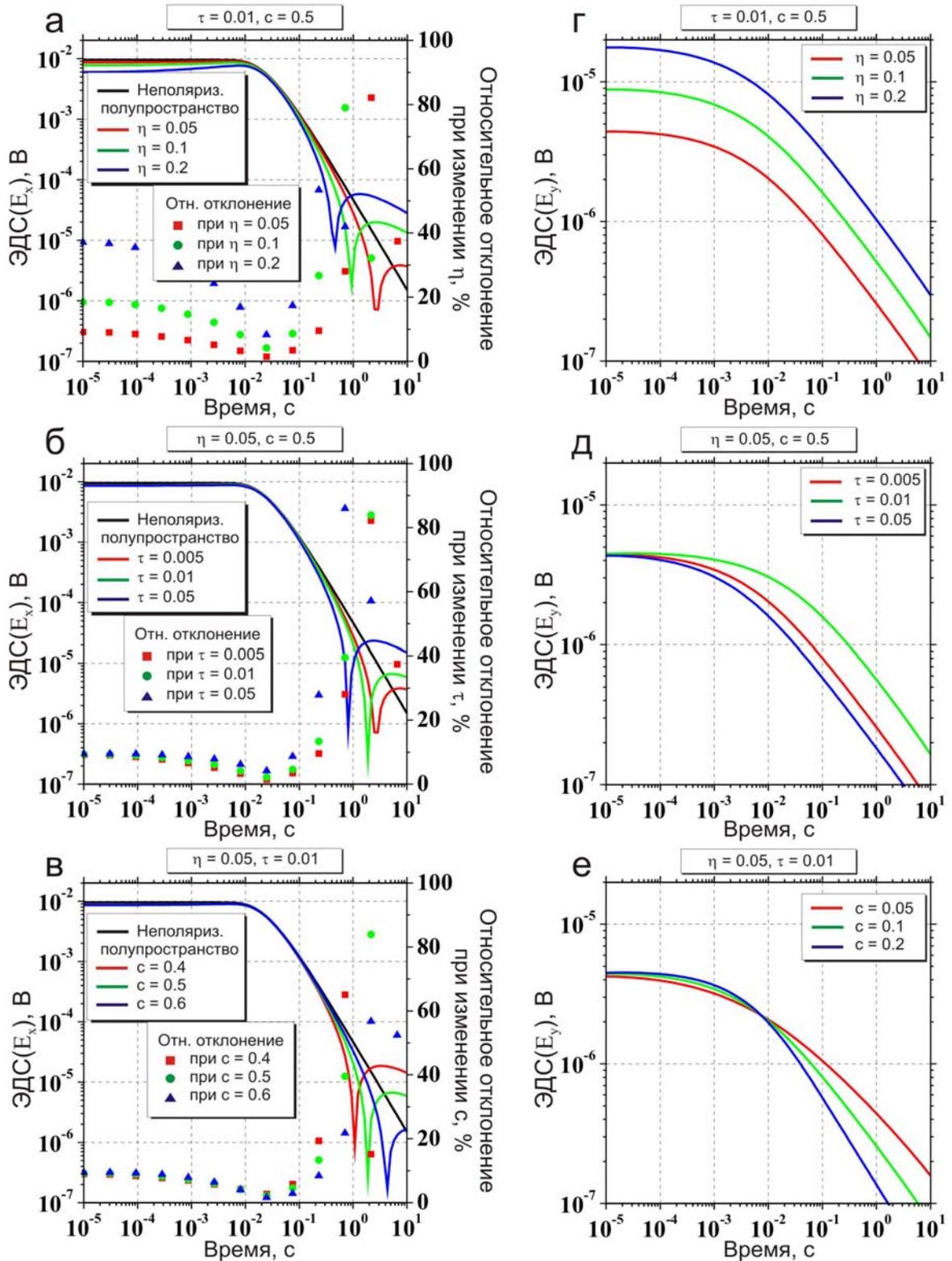


Рис. 2.3. Влияние параметров поляризации на моделируемый сигнал компонент E_x, E_y .

Сопротивление полупространства $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$,

экваториальная гальваническая установка $AB = 2000 \text{ м}$, $MN = 200 \text{ м}$.

а, г – поведение сигнала (сплошные линии) и отклонение (точечные графики) относительно отклика от неполяризуемой среды при изменении поляризуемости η ; б, д – при изменении времени релаксации τ ; в, е – при изменении показателя степени c .

На рис. 2.3 показано поведение сигнала при изменении каждого из параметров поляризации поочередно (а, г – поляризуемости η ; б, д – времени релаксации τ ; в, е – показателя степени c) с фиксированными остальными характеристиками среды, а также рассчитано относительное отклонение от сигнала для неполяризуемой среды (точечные графики). Видно, что параметры ВП оказывают существенное влияние на измеряемые электрические компоненты E_x, E_y при гальваническом возбуждении среды. Для E_x это особенно проявляется на поздних временах – в данном случае начиная с 0,1 сек – кривая зондирования переходит через ноль, а отклонение отклика от поляризуемого полупространства относительно сигнала, рассчитанного для неполяризуемой среды, может достигать 100% и больше (рис. 2.3 а, б, в). Компонента E_y отсутствует в случае однородного проводящего неполяризуемого полупространства. При введении ВП сигнал становится ненулевым, а амплитуда сигнала зависит от поляризуемости η (рис. 2.3 г), а влиянию τ и c наиболее подвержены поздние времена становления поля (рис. 2.3 д, е).

Магнитные компоненты

Следующим этапом было изучение влияния ВП на вектор производных магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$. Были исследованы все компоненты, в результате чего установлено, что любая из них мало чувствительна к поляризуемым средам (к изменениям параметров ВП) в случае гальванического возбуждения. Для иллюстрации выбраны компоненты \dot{B}_y, \dot{B}_z (рис. 2.4) как наиболее показательные. Как и в случае электрических компонент, на рисунке представлены сигналы с различными значениями параметров поляризации и отклонение сигналов относительно неполяризуемого проводящего полупространства (точечные графики).

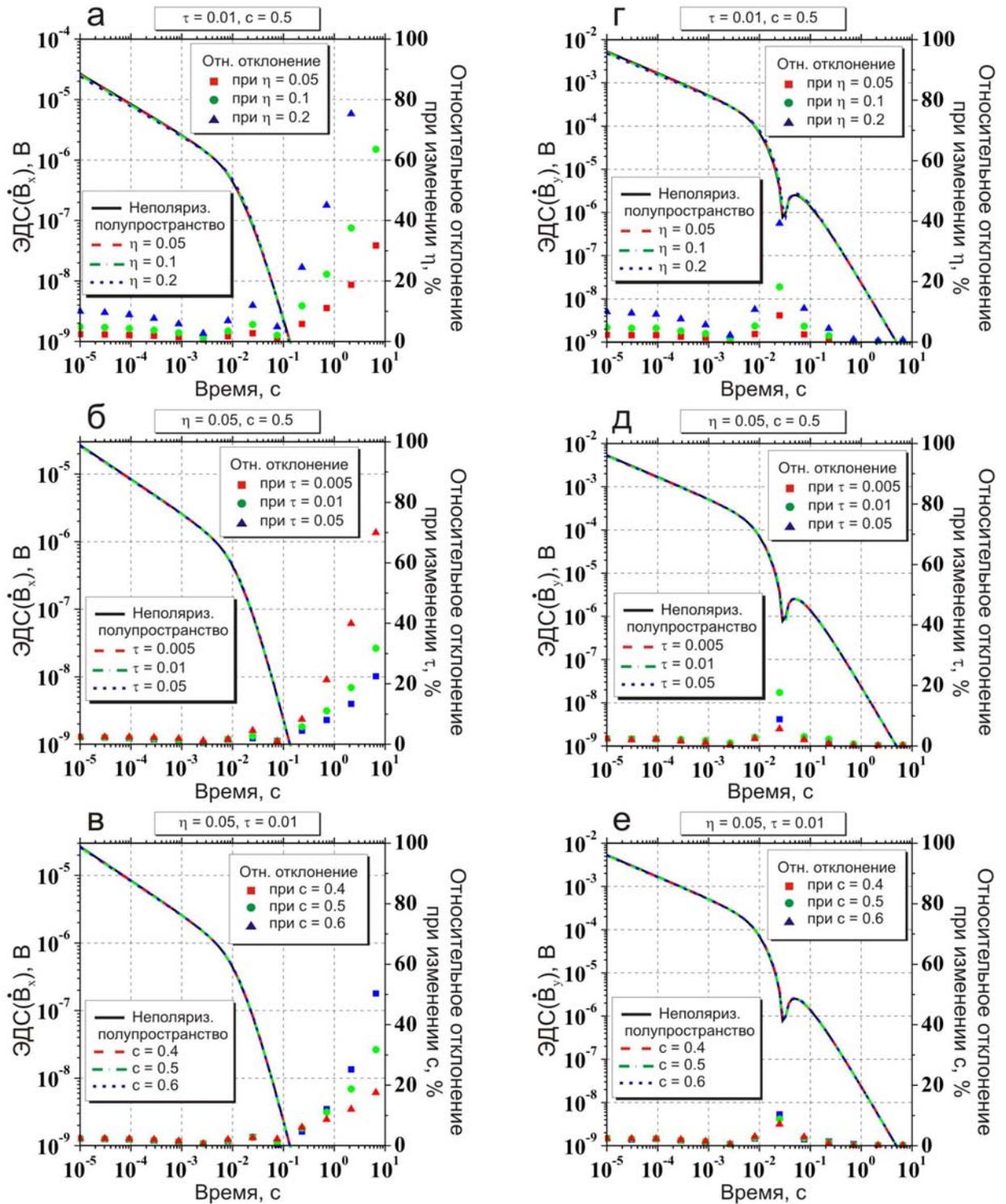


Рис. 2.4. Влияние параметров поляризации на моделируемый сигнал компонент \dot{B}_y, \dot{B}_z .

Сопротивление полупространства $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, экваториальный тип установки.

$AB = 2000 \text{ м}$, эффективная площадь индуктивных приемников $Q = 2500 \text{ м}^2$

а, г – поведение сигнала (сплошные линии) и отклонение (точечные графики) относительно отклика от неполяризующейся среды при изменении поляризуемости η ; б, д – при изменении времени релаксации τ ; в, е – при изменении показателя степени c .

Нетрудно заметить, что с введением поляризации сигнал меняется очень слабо – меньше 10%. И лишь в некоторых случаях, когда поляризуемость достигает $\eta = 0,2$, что очень редко встречается при реальных измерениях, можно наблюдать отклонения в 20% (рис. 2.4 а, г).

Чтобы убедиться в том, что сделанные выводы по итогам анализа сигналов для полупространства можно распространять на горизонтально-слоистые среды, проведены расчеты становления электромагнитного поля для разных типов моделей: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$, $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$. Проводился сравнительный анализ сигнала для поляризующейся среды и соответствующей среды с нулевыми значениями параметров поляризации (ρ и h постоянны). В качестве иллюстрации были выбраны модели 1, 2 (табл. 2.1 и 2.2).

Таблица 2.1

Тестовая модель 1

	ρ , Ом	h , м	η	τ	ϵ
1 Слой	100	100	0.02	0.1	0.5
2 Слой	40	200	0.05	0.02	0.55
3 Слой	80	300			
4 Слой	500	∞			

Таблица 2.2

Тестовая модель 2

	ρ , Ом	h , м	η	τ	ϵ
1 Слой	100	100			
2 Слой	40	200	0.05	0.02	0.55
3 Слой	80	300	0.02	0.1	0.5
4 Слой	500	∞			

На рис. 2.5, 2.6 представлены кривые становления (черная кривая – неполяризующаяся среда: ρ и h приведенных моделей; красная – модель 1; зеленая – модель 2) и относительные отклонения от сигнала для соответствующей неполяризующейся среды (точечные графики).

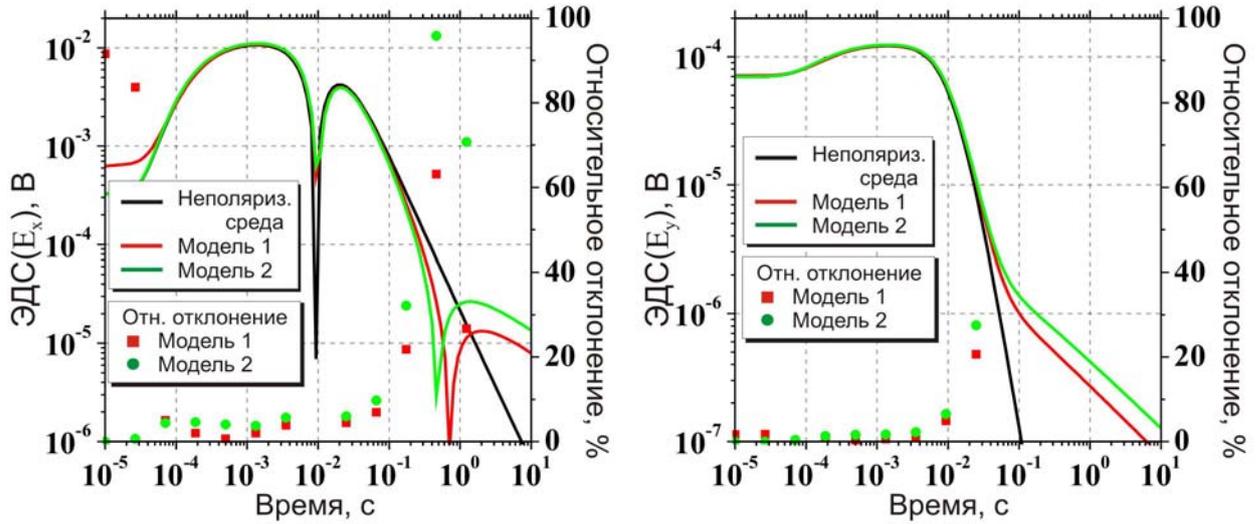


Рис. 2.5. Влияние параметров поляризации на моделируемый сигнал компонент E_x, E_y .

Экваториальная гальваническая установка: $AB = 2000\text{ м}$, $MN = 200\text{ м}$.

Сплошные линии – поведение сигнала, точечные графики – относительное отклонение отклика от неполяризуемой среды для модели 1,2.

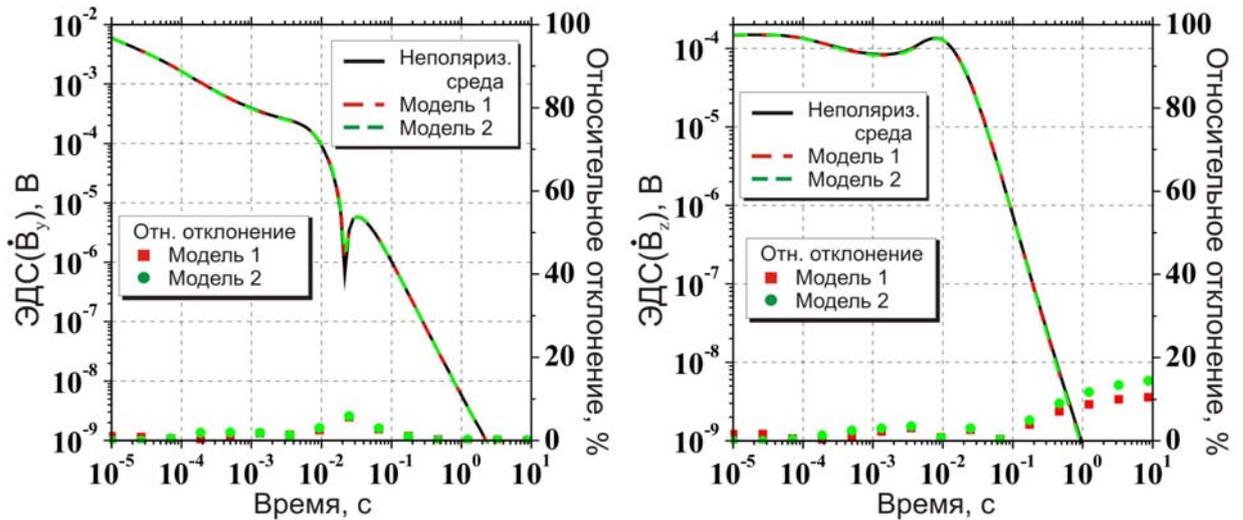


Рис. 2.6. Влияние параметров поляризации на моделируемый сигнал компонент B_y, B_z .

Экваториальный тип установки: $AB = 2000\text{ м}$,

эффективная площадь индуктивных приемников $Q = 2500\text{ м}^2$.

Сплошные и пунктирные линии – поведение сигнала, точечные графики – относительное отклонение отклика от неполяризуемой среды для модели 1,2.

Сравнительный анализ синтетических переходных характеристик над разными средами позволяет утверждать, что характер поведения кривых становления в зависимости от параметров поляризации над полупространством и горизонтально-слоистой средой не имеет принципиальных отличий.

Таким образом, показано, что при гальваническом возбуждении среды чувствительность индукционных и электрических компонент к параметрам поляризации Cole-Cole различна: электрические компоненты E_x, E_y подвержены большому влиянию процессов ВП на поздних временах (относительное отклонение может достигать 100% и больше), а магнитные $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ – слабо чувствительны к поляризующимся средам (относительное отклонение в подавляющем большинстве исследованных случаев остается в пределах погрешности измерения).

Разная чувствительность индукционных и гальванических измерений к процессам поляризации непременно должна учитываться в совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований, что должно привести к улучшению качества интерпретации измерений, осложнённых присутствием ВП.

2.4. Решение обратной задачи нестационарной электродинамики (совместная инверсия) методом нелинейной минимизации Нелдера-Мида

С использованием математического аппарата для расчета установившегося поля произвольного источника на дневной поверхности, приведенного в разделах 2.1 и 2.2, и метода нелинейной минимизации строится алгоритм решения обратной задачи (совместной инверсии). Параметры геоэлектрического разреза находятся путем минимизации функционала невязки, характеризующего взвешенное среднеквадратичное

отклонение экспериментальных и модельных данных. Целевая функция в общем виде задавалась выражением вида:

$$\Phi(\mathbf{P}, t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_j^{\text{э}}(t_i) - f_j^T(\mathbf{P}, t_i)}{\delta_j(t_i) f_j^{\text{э}}(t_i)} \right)^2 \right]^{1/2} \right]. \quad (2.20)$$

Здесь \mathbf{P} – вектор из пространства модельных параметров (в нашем случае $\mathbf{P} = (\rho, h, \eta, \tau, c)$), M – число используемых в совместной инверсии компонент электромагнитного поля, $\{t_i, i = 1, \dots, N\}$ – времена измерения переходной характеристики, $f_j^{\text{э}}(t)$ – экспериментальные данные, $f_j^{\text{р}}(\mathbf{P}, t)$ – расчётный модельный сигнал, δ – относительная ошибка измерений. Минимизация выполняется корректировкой параметров модели \mathbf{P} . Выбор начального приближения набора параметров $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0$ осуществляется на основе имеющейся геолого-геофизической информации. Как уже говорилось выше, при решении обратной задачи использовался метод нелинейной минимизации – модифицированный метод Нелдера-Мида (или метод «деформируемого многогранника») [Nelder, Mead, 1965; Gill et al., 1981]. На каждом шаге итерационного процесса сначала решается прямая задача (при совместной инверсии – несколько задач), моделирующая соответствующий эксперимент. Это позволяет вычислить значение функционала среднеквадратичного отклонения (СКО). Итерации повторяются до тех пор, пока не достигнут критерий сходимости:

$$\Phi(\mathbf{P}_i, t) < \varepsilon_1 \text{ или } \Phi(\mathbf{P}_i, t) - \Phi(\mathbf{P}_{i+1}, t) < \varepsilon_2,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – заданные произвольные малые числа, а \mathbf{P}_i – модельные параметры на очередной итерации. Стоит отметить, что для синтетических кривых СКО

составляет доли процентов, поэтому в качестве критерия эффективности инверсии будем использовать точность подбора искомых параметров (отклонение относительно точных значений). Глобальность найденного экстремума контролируется выбором различных стартовых приближений и изменением размеров начального многогранника. Привлекательность данного метода решения обратной задачи заключается в том, что нет необходимости вычислять производные решения прямой задачи по модельным параметрам, что требуется в градиентных методах. Примеры эффективного использования метода деформированного многогранника при решении обратных задач нестационарной геоэлектрики в поляризующихся средах содержатся в работах [Ельцов и др., 1999; Эпов и др., 2006; Kozhevnikov, Antonov, 2006; Кожевников, Антонов, 2007].

2.5. Разработка и программная реализация алгоритма совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом чувствительности индукционных и гальванических систем измерений к ВП

На основе приведенного в разделе 2.4 алгоритма и решения прямых задач для горизонтально-слоистой поляризующейся среды <Line_TEMIP> (Эпов М.И., Антонов Е.Ю. и др., ИНГГ СО РАН, 1996) создана программа <Line_TEMIP_II>, которая позволяет проводить инверсию по заданному количеству используемых компонент. При этом слабая чувствительность вектора производных магнитной индукции к поляризующимся средам, доказанная в разделе 2.3., позволяет рассматривать среду, осложненную ВП, как неполяризующуюся и восстанавливать сопротивления ρ_i и мощности h_i исследуемого разреза с хорошей точностью. Высокая чувствительность электрических компонент к ВП может быть использована для подбора параметров поляризации, где в качестве стартового приближения используется неполяризующаяся модель, восстановленная в результате

совместной инверсии компонент вектора производных магнитной индукции. Совместная инверсия позволяет сузить область эквивалентности решений обратной задачи, уменьшив таким образом ошибку определения искомых параметров. Описанный алгоритм совместной инверсии можно представить следующей блок схемой (рис. 2.7) программы <Line_TEMIP_II>:

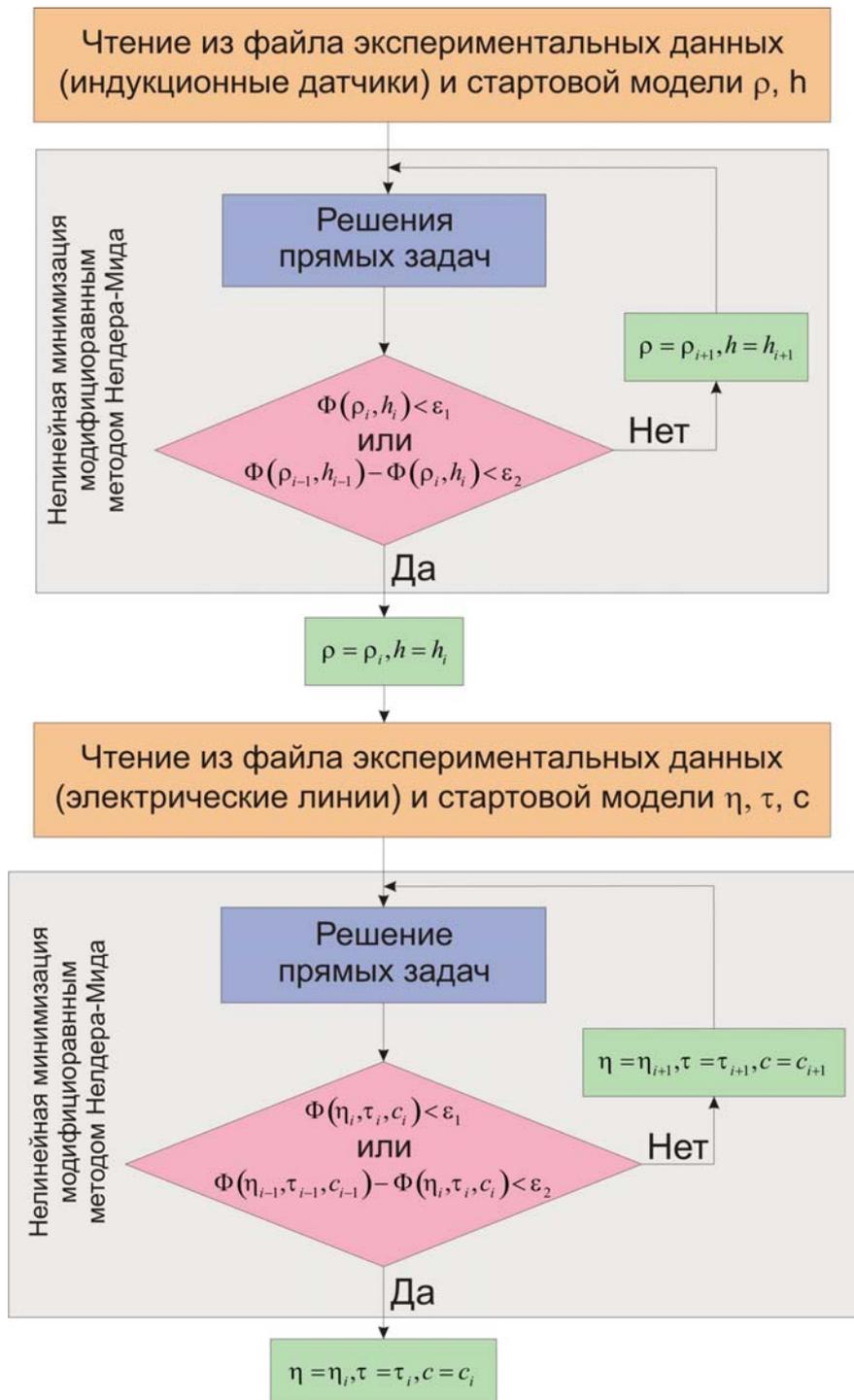


Рис. 2.7. Блок схема алгоритма программы совместной инверсии <Line_TEMIP_II>.

Прежде чем использовать совместную инверсию была доказана ее состоятельность: на синтетических данных показано, что с увеличением количества компонент вектора производных магнитной индукции, используемых при инверсии, качество восстановления параметров геоэлектрического разреза возрастает. Было сгенерировано несколько наборов синтетических данных, на примере одного из которых (табл. 2.3) проиллюстрируем полученные результаты.

Таблица 2.3

Тестовая модель 3

	ρ , Ом	h , м	η	τ	c
1 Слой	10	170	0.01	0.01	0.64
2 Слой	40	580	0.02	0.2	0.35
3 Слой	15	640			
4 Слой	2000	∞			

Рассчитанные кривые становления для модели 3 использовались в качестве псевдоэкспериментальных, а критерием эффективности подбора, как уже говорилось, считается точность подбора искомых параметров. Начальное приближение выбиралось с отклонениями параметров до 25% от истинного и поочередно проводилась инверсия с привлечением одной, двух или трех компонент магнитной индукции. В табл. 2.4 приведена одна из стартовых моделей, которая использовалась при тестировании совместной инверсии с отклонением больше 12%.

Таблица 2.4

Пример стартовой модели при тестировании совместной инверсии

	ρ , Ом	h , м	η	τ	c
1 Слой	11.6	144	0	0	0
2 Слой	40	580	0	0	0
3 Слой	17.2	555			
4 Слой	2000	∞			

Как было показано ранее, магнитные компоненты слабо зависят от поляризации, а восстановление параметров ВП по ним не представляется

возможным. Поэтому при инверсии с использованием магнитных компонент производился поиск только сопротивления ρ_i и мощности h_i .

Покажем результаты инверсии на примере параметров первого слоя (табл. 2.5). В таблице представлена истинная модель, стартовая и результат восстановления (сопротивление - ρ_1 , мощность - h_1 и продольная проводимость - $\sigma_1 h_1$) с привлечением каждой из компонент по отдельности $\dot{B}_x; \dot{B}_y; \dot{B}_z$, при использовании пар $\dot{B}_x, \dot{B}_y; \dot{B}_x, \dot{B}_z; \dot{B}_y, \dot{B}_z$ и всех компонент $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$. Стоит отметить, что при инверсии по каждой компоненте и паре в реальных условиях неизвестно, результат инверсии какого из случаев считать наиболее истинным, поэтому будем брать среднее арифметическое (либо максимальное отклонение).

Таблица 2.5

Результаты восстановления параметров первого слоя

	$\sigma_1 h_1$	h_1	ρ_1
Истинная модель	17	170	10
Стартовая модель	12.4 (27%)	144	11.6
\dot{B}_x	15.4 (9.4%)	150	10
\dot{B}_y	17.0 (0%)	170	10
\dot{B}_z	13.0 (24%)	78	6
\dot{B}_x, \dot{B}_y	18.1 (6.5%)	180	10
\dot{B}_x, \dot{B}_z	15.4 (9.4%)	150	10
\dot{B}_y, \dot{B}_z	15.3 (10%)	150	10
$\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$	17.7 (4%)	177	10

Из анализа табл. 2.5 видно, что ошибка восстановления параметров (табл. 2.5, в скобках) с привлечением большего количества компонент магнитной индукции уменьшается: среднее арифметическое результатов инверсии по каждой из компонент – 14.8 (ошибка 13%), по паре – 16.2 (4.7%), по трем – 17.7 (4%).

В результате приведенной схемы всевозможных инверсий были получены значения параметров для набора стартовых моделей с различными отклонениями (до 25%). Ошибки результатов подбора продольной проводимости $S_i = \sigma_i h_i$ представлены в графическом виде на рис. 2.8.

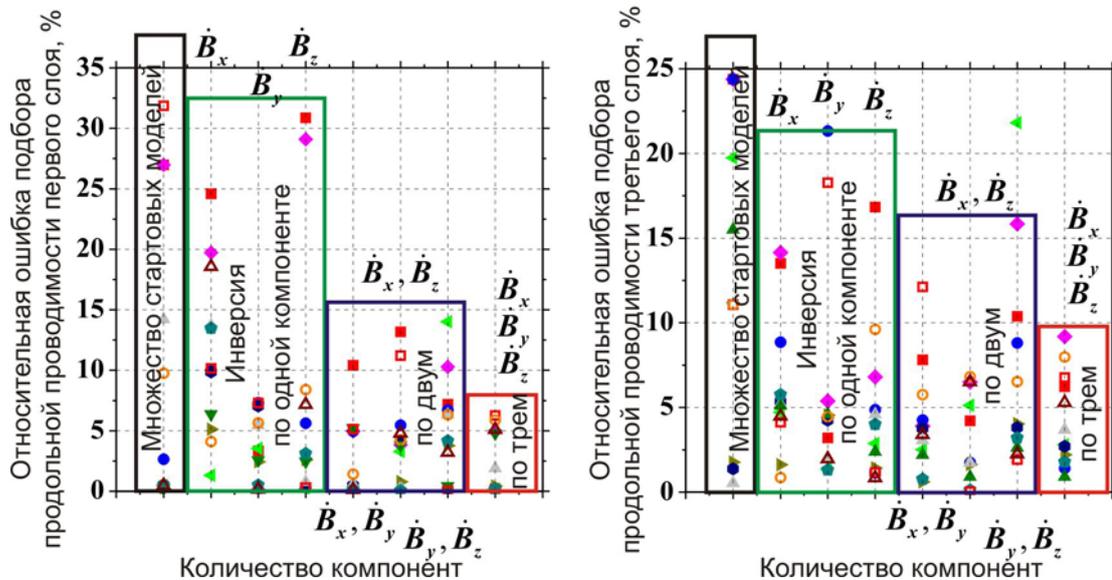


Рис. 2.8. Изменение качества подбора продольной проводимости при увеличении количества используемых компонент в совместной инверсии. Слева – ошибка подбора продольной проводимости относительно истинной для первого слоя, справа – для третьего.

На рис. 2.8 по оси X отмечено начальное отклонение искомым параметров модели от истинных значений, относительная ошибка найденной продольной проводимости от истинной в результате инверсии по одной, двум и трем компонентам. Контурами показаны области ошибок при инверсии по одной $\dot{B}_x; \dot{B}_y; \dot{B}_z$, паре $\dot{B}_x, \dot{B}_y; \dot{B}_x, \dot{B}_z; \dot{B}_y, \dot{B}_z$ и тройке $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ компонент. Видно, что эти области уменьшаются за исключением нескольких допустимых ошибок: ошибка стартовой модели достигает нескольких десятков процентов и последовательно убывает с увеличением количества компонент. Отсюда, можно считать, что качество подбора параметров модели повышается с увеличением количества используемых компонент производных магнитной индукции в совместной инверсии.

С другой стороны, высокая чувствительность электрических компонент к вызванной поляризации дает возможность предположить, что они (компоненты) могут быть использованы для подбора параметров поляризации. При этом по результатам совместной инверсии компонент вектора производных магнитной индукции можно зафиксировать сопротивления и мощности слоев.

Итак, целесообразно проводить инверсию данных многокомпонентных нестационарных зондирований в два этапа. Первый этап - совместная инверсия всех компонент полного вектора производных магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$, что позволит восстановить параметры проводящего разреза (сопротивление и мощность слоев) без учета влияния ВП. Вторым этапом - восстановление параметров поляризации по электрическим компонентам (E_x, E_y) на основе модели, полученной после интерпретации магнитных компонент.

2.6. Тестирование разработанной схемы совместной инверсии на синтетических и экспериментальных данных

Для доказательства эффективности предложенной поэтапной схемы инверсии данных нестационарных зондирований был проведен ряд тестов, один из которых приведен ниже. Для иллюстрации выбрана модель 4, приведенная в табл. 2.6:

Таблица 2.6

Тестовая модель 4

	$\rho, \text{ Омм}$	$h, \text{ м}$	η	τ	c
1 Слой	9.5	145			
2 Слой	15.7	475	0.01	0.03	0.45
3 Слой	36.6	570			
4 Слой	2000	∞			

С использованием тестовой модели 4 были сгенерированы синтетические переходные характеристики, характеризующие описываемую

среду. Затем была выбрана стартовая модель для первого этапа инверсии (табл. 2.7). Возле каждого параметра в скобках указано относительное отклонение от истинных значений параметров, которое составляет не менее 8.8%. В результате совместной инверсии всех компонент полного вектора производных магнитной индукции мы получили хорошее совпадение сопротивления и мощности с истинными значениями: относительное отклонение параметров от истинных значений не превышает 6.7% (табл. 2.8).

Таблица 2.7

Стартовая модель для первого этапа инверсии

	$\rho, \text{Омм}$	$h, \text{м}$	η	τ	c
1 Слой	10.431(9.8%)	165(13.8%)			
2 Слой	14(10.8%)	521(8.8%)	0	0	0
3 Слой	40.153(9.7%)	517(9.3%)			
4 Слой	2000	∞			

Таблица 2.8

Результат совместной инверсии по трем компонентам магнитной индукции

	$\rho, \text{Омм}$	$h, \text{м}$	η	τ	c
1 Слой	9.6(0.5%)	151.2(4.3%)			
2 Слой	15.7(0%)	463.3(2.5%)	0	0	0
3 Слой	36.0(1.6%)	531.4(6.7%)			
4 Слой	2000.0	∞			

Фиксируя сопротивления и мощности слоев, восстановленных с использованием полного вектора производных магнитной индукции, можно приступить ко второму этапу инверсии – восстановлению параметров поляризации с помощью совместной инверсии электрических компонент E_x, E_y . В качестве начального приближения использовались значения параметров Cole-Cole: $\eta = 0.05; \tau = 0.05, c = 0.5$. В результате была получена модель с параметрами близкими к истинным: $\eta = 0.007; \tau = 0.09, c = 0.49$ (см. табл. 2.6). С учетом некорректности решаемой задачи, такой результат можно считать успешным, а предложенную схему поэтапной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований эффективной.

Тестирование предложенного алгоритма и созданной программы <Line_TEMIP_II> на синтетических данных делает необходимым проведение полевых экспериментов. Измерения проводились на двух объектах.

Первый был расположен рядом с Глиняным карьером в 10 км от северо-восточной окраины Новосибирска на левом берегу р. Каменка (правобережный приток Оби) в 12 км выше по течению от ее устья. Согласно результатам геологической съемки [Васютинская, Михайловский, 1963] фундамент здесь представлен позднедевонскими песчаниками, алевролитами, глинистыми и алевроглинистыми сланцами, известняками. По поверхности фундамента развита кора выветривания мощностью не более 10-20 м. Непосредственно на фундаменте залегают озерно-болотные и делювиальные глины и суглинки мощностью 10-20 м, которые перекрываются аллювиально-озерными песками, супесями, суглинками, а также субаэральными суглинками с прослоями делювиальных песков и супесей четвертичного возраста. В зависимости от степени расчлененности рельефа мощность четвертичных отложений колеблется от 15 до 40 м.

Второй участок работ располагался в 8 км к юго-востоку от пос. Верх-Ирмень (Новосибирская область, Ордынский район) в 200 м от левого берега Новосибирского водохранилища на площадке второй надпойменной террасы. По данным геологической съемки [Мисюк, Казеннов, 1979], мощность рыхлых отложений, залегающих на нижнепалеозойском фундаменте, составляет около 60 м. Фундамент здесь сложен песчаниками, алевролитами, аргиллитами и алевролитисто-глинистыми сланцами нижнекаменно-угольного возраста. Поверх фундамента залегают аллювиальные пески мощностью до 10 м, которые перекрываются аллювиальными галечниками и песками верхнечетвертичного возраста мощностью около 15 м, составляющими основание второй надпойменной террасы. Выше залегают супеси и суглинки пойменного аллювия, лессовидные суглинки и делювиальные супеси, мощность которых составляет около 30 – 40 м.

Измерения были выполнены следующими установками: совмещенная петлевая ($100\text{ м} \times 100\text{ м}$), соосная петлевая (генератор - $100\text{ м} \times 100\text{ м}$, приемник - $50\text{ м} \times 50\text{ м}$), параллельная гальваническая (питающая линия - 100 м , приёмная линия - 50 м). На первом объекте была экваториальная (азимут – 90°) установка с разносом 25 м , во втором разнос между центрами линий составил 75 м , а азимутальный угол из центра питающей линии на центр приемной – 30° . При измерениях применялась аппаратура ЗСБ, разработанная совместно в ИНГГ СО РАН и ЗАО НПП ГА «Луч». Качество интерпретации переходных характеристик оценивалось по среднеквадратичному отклонению (СКО), которое описывается вышеупомянутой формулой (2.20).

Глиняный карьер. Первым этапом эксперимента были измерения, выполненные соосной петлевой установкой. После интерпретации переходной характеристики в рамках слоистой проводящей модели были получены параметры геоэлектрического разреза (табл. 2.9) и рассчитаны

Таблица 2.9

Глиняный карьер.
Результат инверсии данных зондирований индуктивной установкой

	$\rho, \text{ Ом м}$	$h, \text{ м}$
1 Слой	49	4
2 Слой	16	44
3 Слой	1700	∞
СКО=0.08		

Экспериментальная и модельная кривые сигнала и их относительное отклонение представлены на рис. 2.9а. Видно, что переходные характеристики практически совпадают, а относительное отклонение не превышает 3%.

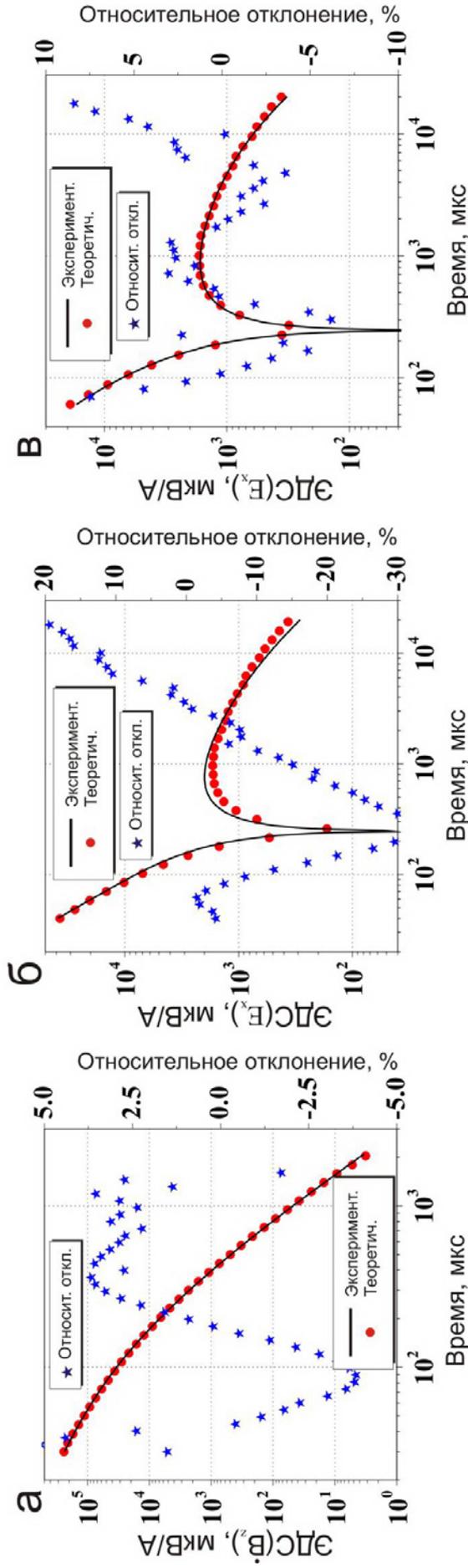


Рис. 2.9. Экспериментальные сигналы, полученные рядом с глиняным карьером, подобранные теоретические кривые становления и их относительное отклонение:

- а – подбор параметров ρ , h по данным индуктивных зондирований соосной петлевой установкой;
- б – подбор параметров η , τ , ϵ по данным зондирований экваториальной гальванической установкой;
- в – подбор параметров ρ , h , η , τ , ϵ по данным зондирований экваториальной гальванической установкой.

Следующим этапом были измерения экваториальной гальванической установкой. Модель, полученная в результате обработки данных индуктивных зондирований (табл. 2.9), была использована для задания проводящего разреза (ρ, h) . После этого проводилась инверсия данных гальванических измерений в рамках модели поляризующейся среды. В результате интерпретации данных с учётом ВП при фиксированных параметрах (ρ, h) был получен геоэлектрический разрез с поляризующимся вторым слоем, параметры которого представлены в табл. 2.10, а соответствующие кривые экспериментальной и расчётной э.д.с. и их относительное отклонение приведены на рис. 2.9б. Качество инверсии (СКО = 0.3) в этом случае неудовлетворительное, относительное отклонение экспериментальной и теоретической кривой становления достигает 30%.

Результат инверсии, полученный при переборе только поляризационных параметров (табл. 2.10), показал, что фиксация параметров удельного сопротивления ухудшает качество интерпретации, в терминах среднеквадратичного отклонения.

Таблица 2.10

Глиняный карьер.
Результат инверсии данных зондирований гальванической установкой

	ρ , Омм	h , м	η	τ	c
1 Слой	49	4			
2 Слой	16	44	0.073	0.00076	0.53
3 Слой	1700	∞			
					СКО=0.3

При интерпретации с одновременным варьированием параметров сопротивления и поляризации (рис. 2.9в) была получена модель (табл. 2.11) с существенно меньшим СКО экспериментальных и модельных кривых. Расхождения в полученных моделях непротиворечивы и могут быть связаны с анизотропией среды, поскольку необходимо иметь в виду, что данные зондирований индуктивной и гальванической установками отражают разную чувствительностью этих систем наблюдения как к анизотропии удельного

сопротивления, так и к пространственной неоднородности геологической среды.

Таблица 2.11

Глиняный карьер.
Результат инверсии данных зондирований гальванической установкой

	ρ , Ом	h , м	η	τ	c
1 Слой	49	4			
2 Слой	40	44	0.014	0.0062	0.63
3 Слой	1700	∞			
					СКО=0.07

Пос. Верх-Ирмень. Как и при первом полевом эксперименте, сначала были выполнены зондирования совмещённой (100 м×100 м) и соосной (генератор - 100 м×100 м, преёмник - 50 м×50 м) петлевыми установками. После интерпретации индуктивных зондирований (рис. 2.10а, б) были получены следующие модели (табл. 2.12):

Таблица 2.12

Пос. Верх-Ирмень.
Результаты инверсии данных зондирований индуктивными установками

Совмещённая: 100 м×100 м			Соосная: 100 м×100 м, 50 м×50 м		
	ρ , Ом	h , м		ρ , Ом	h , м
1 Слой	35	22	1 Слой	36	22
2 Слой	133	22	2 Слой	110	22
3 Слой	48	22	3 Слой	60	22
4 Слой	3000	∞	4 Слой	3000	∞
СКО=0.09			СКО=0.04		

Нетрудно заметить, что качество инверсии высокое, как и совпадение рассчитанных и измеренных кривых э.д.с. (рис. 2.10а, б). Полученные результаты коррелируют с существующими представлениями о геологическом строении данного района, характеризующегося относительно маломощным слоем осадочных пород – 40-100 м и близостью высокоомных пород фундамента.

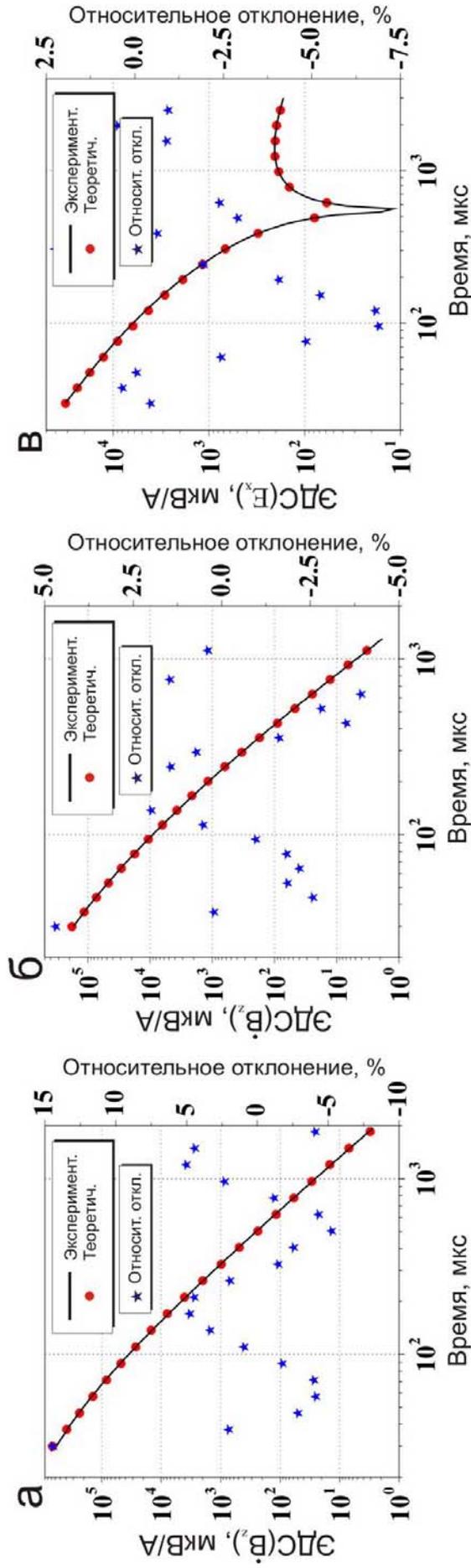


Рис. 2.10. Экспериментальные сигналы, полученные рядом с пос. Верх-Ирмень, подобранные теоретические кривые становления и их относительное отклонение:

- а – подбор параметров ρ , h по данным индуктивных зондирований совмещенной петлевой установкой;
- б – подбор параметров ρ , h по данным индуктивных зондирований соосной петлевой установкой;
- в – подбор параметров (ρ, h, η, τ, c) по данным зондирований экваториальной гальванической установкой.

Следуя разработанной поэтапной инверсии, модели из табл. 2.12 были использованы в качестве начального приближения при интерпретации сигналов, измеренных гальванической измерительной системой. Инверсия таких наблюдений (рис. 2.10в) дала хороший результат: СКО=0.03, а относительное отклонение кривых не превышает 7%. В итоге была получена следующая модель (табл. 2.13):

Таблица 2.13

Пос. Верх-Ирмень.

Результат инверсии данных зондирований гальванической установкой

	ρ , Омм	h , м	η	τ	c
1 Слой	67	23	0.044	0.00001	0.5
2 Слой	230	22			
3 Слой	63	23	0.058	0.0014	0.52
4 Слой	4800	∞			
СКО=0.03					

Примечательным является тот факт, что в инверсии были задействованы все параметры разреза, а результат показал совпадение границ слоёв по данным индуктивных и гальванических измерений. Это еще одно доказательство работоспособности предложенной поэтапной схемы инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований.

На завершающем этапе тестирования предложенной схемы совместной инверсии данных нестационарных измерений использовались данные, полученные на Крестищенском месторождении Харьковской области (Украина), которые были получены системой, аналогичной LOTEM: источник – заземленная линия $AB = 2000\text{ м}$, приемники в виде заземленных линий ($MN = 100\text{ м}$) и индукционных петель с эффективной площадью $Q = 80000\text{ м}^2$, разнос $R = 2828\text{ м}$.

В качестве априорной информации использовались геологические данные. По результатам инверсии отдельно каждой из магнитных компонент было определено сопротивление слоев, которое использовалось в дальнейшем. В результате совместной инверсии всех компонент полного

вектора производных магнитной индукции был построен геоэлектрический разрез (рис. 2.11), хорошо отвечающий геологическим данным (рис. 2.12), а СКО экспериментальных и теоретических данных в большинстве случаев не превышало 0.05. Это подтверждает высокую результативность совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных электромагнитных зондирований для повышения информативности метода становления поля.

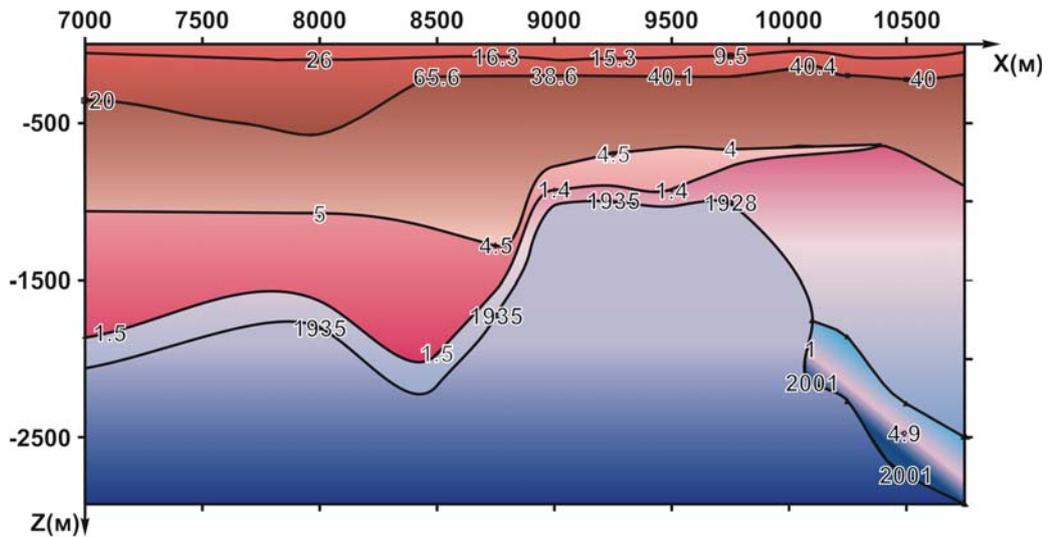


Рис. 2.11. Геоэлектрический разрез, полученный в результате совместной инверсии производных вектора магнитной индукции при исследованиях на территории Крестищенской площади (Украина). Цифрами на разрезе обозначено УЭС.

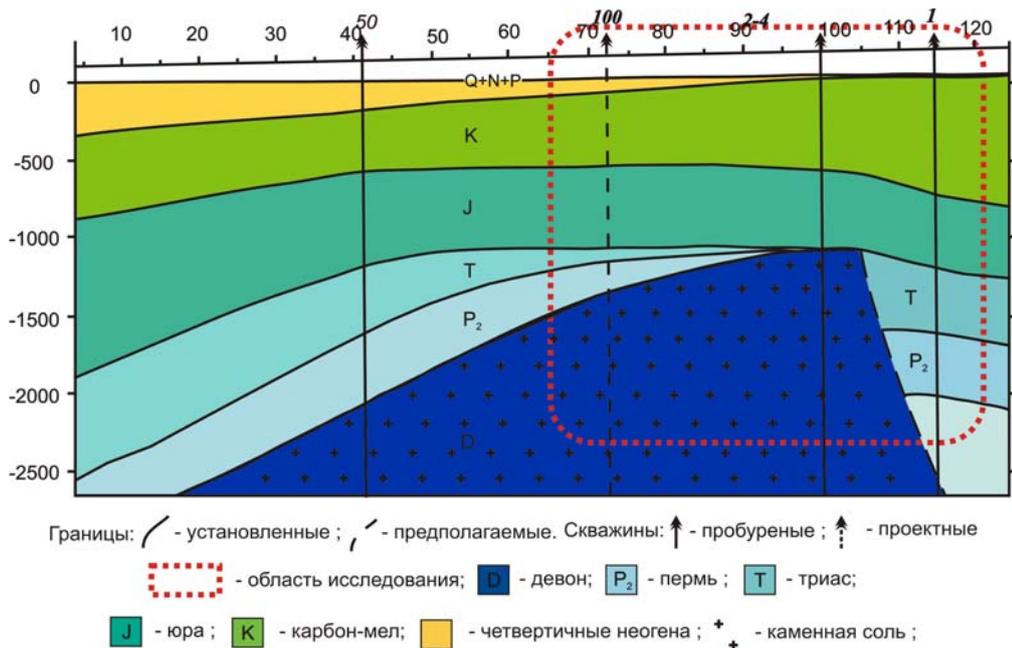


Рис. 2.12. Геологический профиль Крестищенской площади по линии №50.

Таким образом, на синтетических и экспериментальных данных показано, что предложенный поэтапный алгоритм инверсии, учитывающий разную чувствительность индукционных и электрических компонент электромагнитного поля к ВП, является эффективным инструментом повышения достоверности геоэлектрических разрезов при нестационарных зондированиях поляризующихся сред.

Выводы

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что чувствительность гальванических и индукционных компонент поля к параметрам поляризации Cole-Cole различна: влияние частотной дисперсии сопротивления на компоненты магнитной индукции $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ весьма слабое и лишь в некоторых случаях, редко встречающихся на практике, отклонение может достигать 10% относительно отклика от неполяризующейся среды. Моделирование электрических компонент E_x, E_y над поляризующимися средами показывает их значительную зависимость от параметров поляризации: на поздних временах изменение сигнала относительно неполяризующейся среды может составлять 100% и больше.

Разработана и программно реализована схема (алгоритм) для совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований с привлечением необходимого количества компонент электромагнитного поля, в основу которого положены прямые задачи электродинамики (Антонов Е.Ю., Эпов М.И. и др.). С использованием разработанного инструмента инверсии на синтетических данных показано, что с увеличением количества компонент вектора производных магнитной индукции при инверсии качество восстановления параметров геоэлектрического разреза возрастает. Это служит доказательством

эффективность совместной инверсии многокомпонентных нестационарных зондирований.

Разработан поэтапный алгоритм инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований, с большой эффективностью учитывающий разную чувствительность гальванических и индукционных компонент к вызванной поляризации, проверенный численными и полевыми экспериментами:

1 этап – совместная инверсия компонент полного вектора производных магнитной индукции $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$. В результате чего находим сопротивление и мощность слоев (ρ_i, h_i) .

2 этап – совместная инверсия электрических компонент E_x, E_y .

Результатом будут параметры поляризующегося геоэлектрического разреза $(\rho_i, h_i, \eta_i, \tau_i, c_i)$.

На реальных полевых данных (Крестищенское месторождение, Украина) показано, что использование разработанной схемы повышает качество интерпретации электромагнитных измерений. С использованием экспериментальных данных построен геоэлектрический разрез, согласующийся с геологическим строением площади исследования.

Таким образом, из выше изложенного вытекает **первый научный результат**:

Алгоритм и программная реализация совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований поляризующихся геологических сред с учетом чувствительности индукционных и гальванических измерительных систем к вызванной поляризации.

Глава 3. РАЗДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧАСТИ СИГНАЛА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ ПУТЕМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СИСТЕМЫ

Наряду с совместной инверсией, разделение процессов ВП и становления поля путем поиска оптимальной конфигурации измерительной системы является еще одним инструментом для уменьшения области эквивалентности искомым решений обратной задачи. Поэтому исследования в данном направлении, несомненно, являются актуальными и гарантируют повышение информативности метода и качества интерпретации данных ЗС.

В данной главе с помощью математического моделирования исследовано электромагнитное поле над поляризующейся средой, возбуждаемое гальваническим линейным источником, в зависимости от конфигурации установки (расположения и направления приемника). Полученные теоретические результаты подтверждены полевыми экспериментами.

3.1. Численное исследование изменения нестационарного сигнала установки с гальваническим источником в зависимости от азимутального угла измерительной системы

В электроразведке различают несколько типов установок в зависимости от положения приемника и направления его момента – углов системы измерения: угол φ между осью ОХ и прямой соединяющей центры источника и приемника будем называть азимутальным, а угол между осью ОХ и моментом приемника ψ – углом между моментами системы (рис 3.1 I). В связи с этим, если момент приемника MN перпендикулярен к радиусу между его центром и центром питающего диполя r или $\psi = \varphi \pm 90$, то такую

установку называют азимутальной $M_a N_a$. Частным случаем азимутальной установки является экваториальная установка $\varphi = 90^\circ$ - $M_\varepsilon N_\varepsilon$. Если приемный диполь $M_p N_p$ направлен вдоль r , то это радиальная установка. Осевая установка $M_o N_o$ - частный случай радиальной, $\varphi = 0^\circ$ (рис 3.1 II).

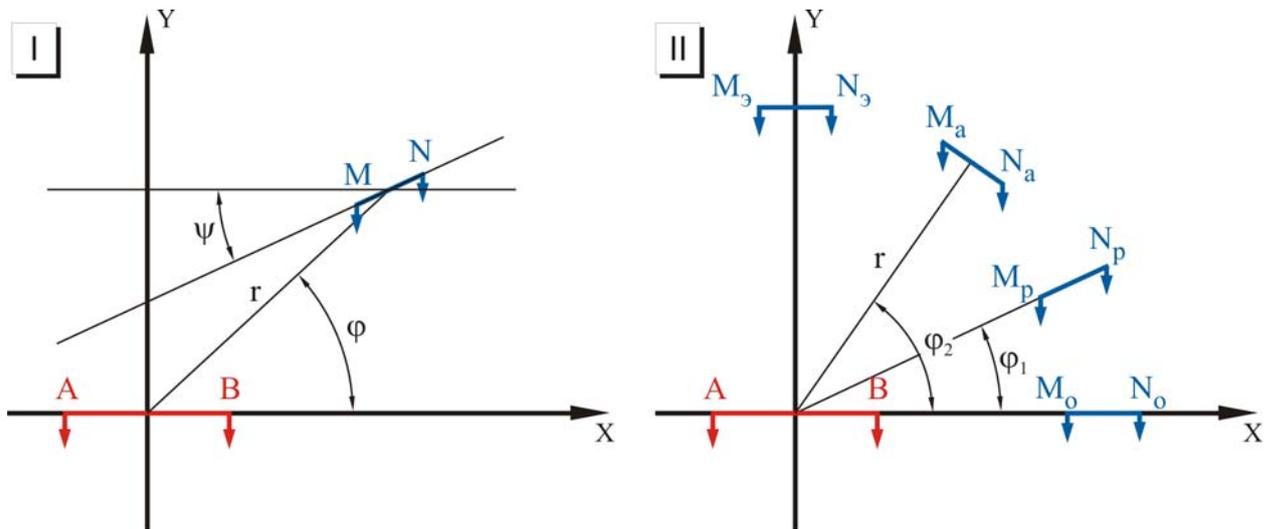


Рис. 3.1 Схемы различных измерительных установок.

I – общий случай измерительной системы; II – общепризнанные типы установок: $M_a N_a$ - азимутальная, $M_\varepsilon N_\varepsilon$ - экваториальная, $M_p N_p$ - радиальная; $M_o N_o$ - осевая.

При численном исследовании степени влияния ВП на нестационарный сигнал в зависимости от азимутального угла использовалась параллельная установка $\psi = 0^\circ$. Измерительная система и ее параметры при имитации выбирались, как и в численных экспериментах, описанных в первой главе, исходя из характерных размеров LOTEM: 2000 м – длина питающей линии АВ, 2500 м^2 – эффективная площадь приемной петли (Q), 200 м – длина приемной линии MN, центр диполя АВ совпадает с центром координат, а момент направлен по оси ОХ (рис. 3.2). Компоненты электрического поля (E_x, E_y) и полного вектора производных магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$ рассчитывались для дипольного гальванического источника.

Теоретическое обоснование, приведенное в первой главе, и решение

прямых задач для расчета поля над горизонтально-слоистой средой (Антонов Е.Ю., Эпов М.И.) позволяют моделировать становление каждой из измеряемых компонент, а также пространственно-временное распределение электромагнитного поля в заданный момент времени на дневной поверхности в виде изолиний.

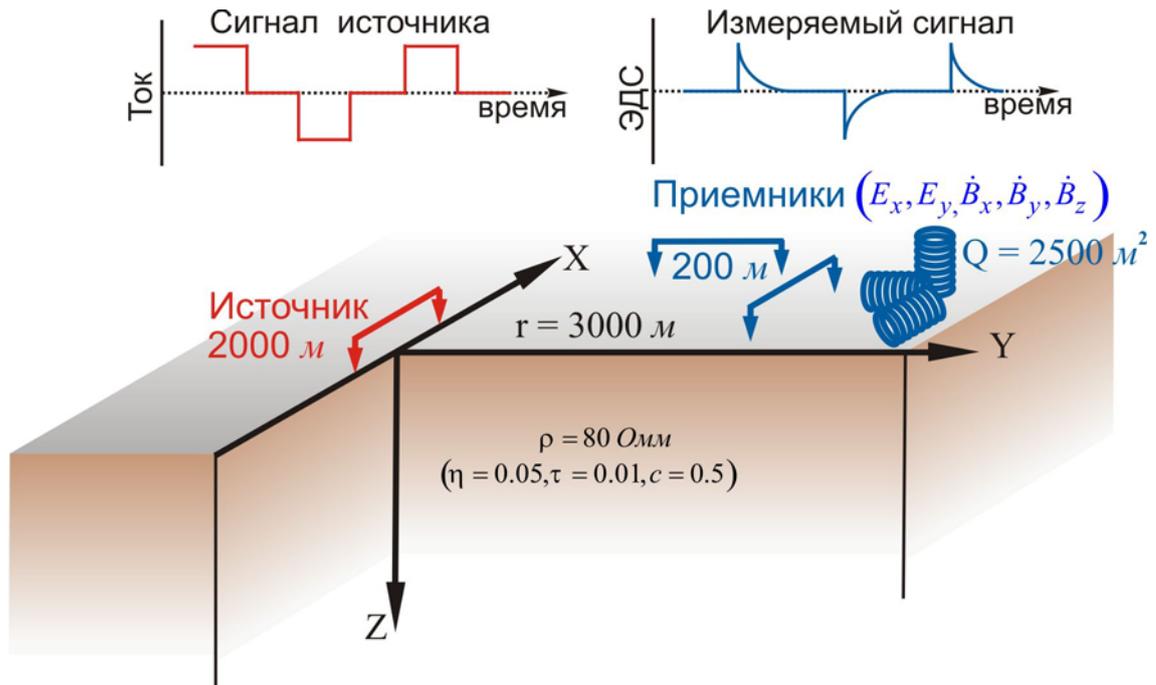


Рис. 3.2. Геоэлектрическая модель и система измерений.

Полупространство

Как уже было показано во второй главе на примере параметров поляризации, становление электромагнитного поля, генерируемого гальваническим источником в зависимости от конфигурации системы измерения, можно проследить при исследовании сигнала, рассчитанного над поляризуемым полупространством. Кривые становления и изолинии электромагнитного поля на дневной поверхности рассчитывались для среды с удельным электрическим сопротивлением $80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и характерными для осадочных ионопроводящих пород параметрами поляризации: $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$. Исследование становления поля, генерируемого

гальваническим источником, в зависимости от положения приемника проводились последовательно для электрических компонент (E_x, E_y) и для каждой составляющей полного вектора магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$.

Электрические компоненты

Известно, что E_x в неполяризуемом полупространстве имеет затухание, пропорциональное $t^{-3/2}$ (рис. 3.3а, черная кривая), и не зависит от азимутального угла, а изолинии в каждый момент времени представляют собой концентрические окружности (в случае дипольного приближения) с центром в начале координат. В поляризуемой среде возникают сигналы, имеющие аномальное затухание: медленное затухание, немонотонность и сигналы со сменой знака. На рис. 3.3 представлены кривые становления (а), а также изолинии (б, в) на фиксированных временных задержках с изображением схем измерения. Здесь и далее цвет приемной линии на схеме измерения будет совпадать с цветом соответствующей синтетической кривой становления. Как уже было сказано, на рис. 3.3 а представлены кривые становления при различных положениях приемника (параллельная установка с разными азимутальными углами $\varphi = 45^\circ, 55^\circ, 75^\circ$). Отсюда следует, что есть положения приемника, в которых сигнал меняет знак (синяя кривая) и область, где сигнал затухает медленнее, чем $t^{-3/2}$ (красная кривая). Необходимо отметить, что существует угловой сектор, где чувствительность к ВП не так существенна (рис. 3.3а, зеленая кривая). Такое изменение сигнала можно объяснить, если рассмотреть карты изолиний электромагнитного поля (рис. 3.3б, в). Построение изолиний проводилось только в первом квадранте ввиду симметрии относительно начала координат и однородности рассматриваемой модели, из чего следует симметрия распространения электромагнитного поля. Пространственно-временное распределение компоненты электромагнитного поля E_x на дневной поверхности показывает, что для поздних времен становления поля

присутствуют две области – монотонного (рис. 3.3б, в, красная область) и знакопеременного поведения сигнала (рис. 3.3б, в, синяя область). Поэтому, при попадании приемника в ту или иную зону, меняются характеристики сигнала.

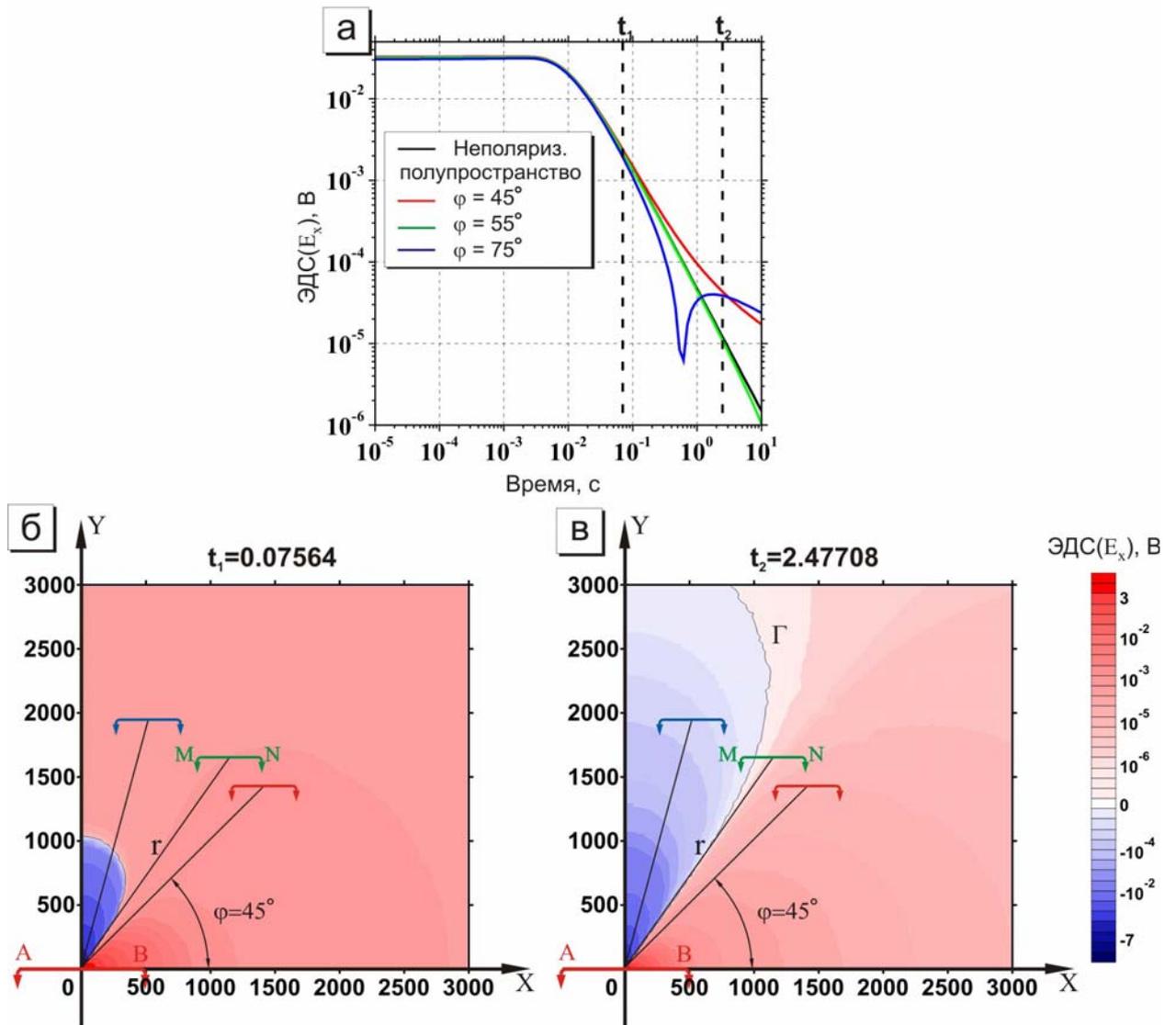


Рис. 3.3. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал E_x .

а – синтетические сигналы компоненты E_x ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Модель поляризующегося полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.

Установка: $AB = 2000 \text{ м}$, $MN = 200 \text{ м}$.

Также установлено важное свойство – граница раздела Γ отрицательных и положительных значений сигнала проходит через точки

пространства, где влияние вызванной поляризации ослаблено. Описанную особенность иллюстрирует переходная характеристика, рассчитанная для положения приемника $\varphi = 55^\circ$ (рис. 3.3а, зеленая кривая). Изолинии на дневной поверхности (рис. 3.3в) и схематичное изображение приемника (рис. 3.3в, MN зеленого цвета) подтверждают, что линия расположена в непосредственной близости к границе Г.

Таким образом, установлено, что сигнал измеряемой компоненты E_x сильно зависит от азимутального угла измерительной системы, что, в свою очередь, влияет на чувствительность к параметрам поляризации и может быть использовано для получения данных, по которым с высокой точностью восстанавливается строение проводящего неполяризующегося разреза. Этот факт является предметом для более детального исследования в дальнейшем.

Для изучения компоненты E_y при изменении угла также проводилось моделирование электромагнитного поля в поляризующемся полупространстве. В результате по аналогии с компонентной E_x были построены карты изолиний и изменение сигнала в зависимости от азимутального угла φ (рис. 3.4). Как уже было упомянуто во второй главе, при рассмотрении проводящего неполяризующегося полупространства компонента E_y отсутствует, значит влияние ВП на сигнал очевидно, так как сигнал E_y в поляризующемся полупространстве становится ненулевым. Численное моделирование данной компоненты позволяет установить, что помимо симметрии относительно осей координат можно наблюдать симметричную картину изолиний поля относительно прямых $y = x$ и $y = -x$. При имитации переходных характеристик E_y каких-либо качественных отличий сигнала для разных азимутальных углов, как это было в случае компоненты E_x , не обнаружено. Установлено, что изменение угла влияет на уровень измеряемого сигнала, максимум которого находится на упомянутых

линиях симметрии (рис. 3.4 а, красная кривая; рис. 3.4б, в, MN красного цвета).

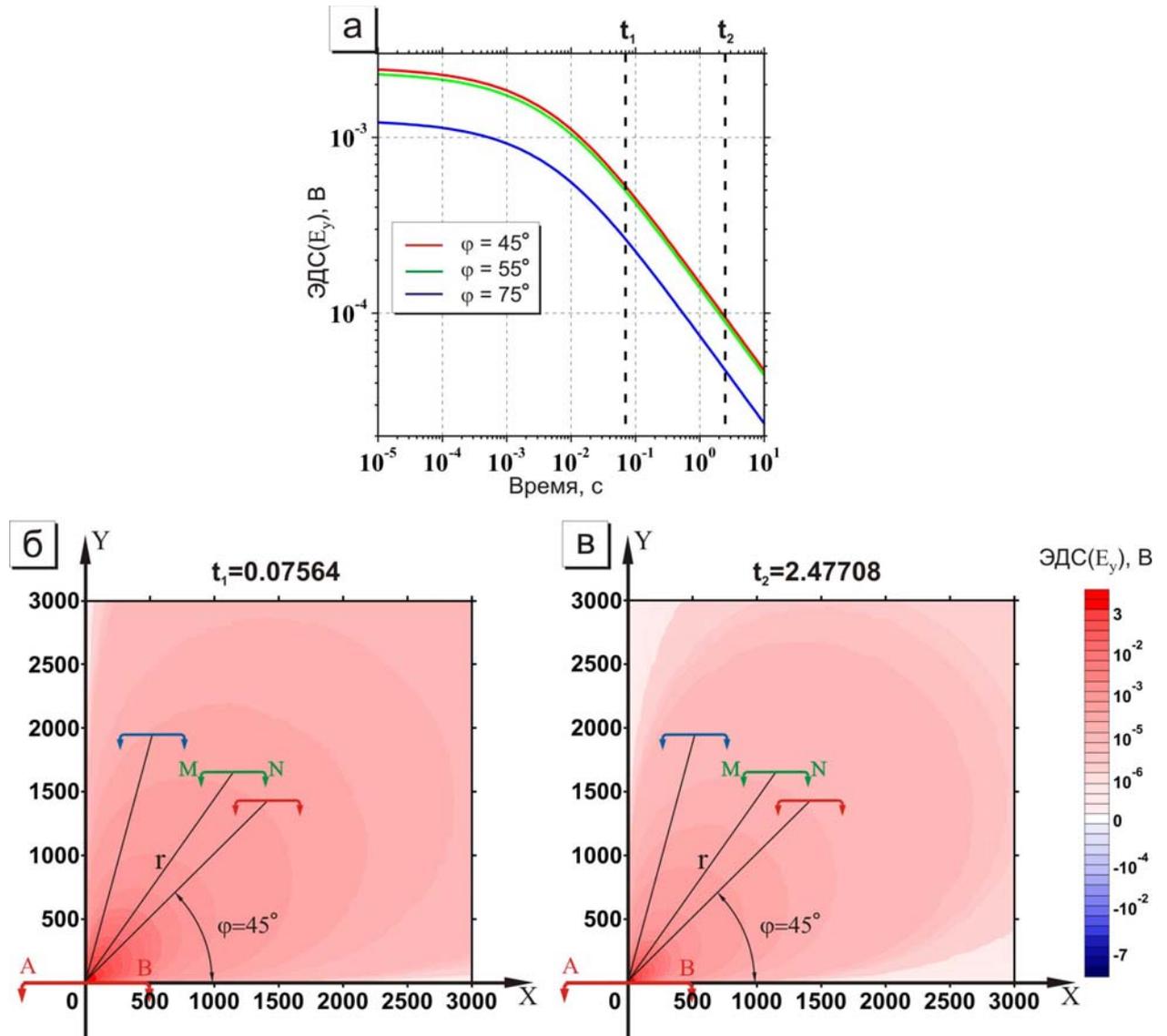


Рис. 3.4. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал E_y .

а – синтетические сигналы компоненты E_y ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке

Модель поляризующегося полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.

Установка: $AB = 2000 \text{ м}$, $MN = 200 \text{ м}$.

Магнитные компоненты

Как было показано во 2-й главе, магнитные компоненты слабо чувствительны к параметрам ВП. Тем не менее убедимся, что изменение азимутального угла установки не приводит к изменению чувствительности к поляризации. Для этой цели по аналогии с электрическими компонентами

была проведена имитация сигналов и рассчитаны их отклонения относительно соответствующих откликов от неполяризуемой среды, построены изолинии распространения каждой из компонент вектора производных магнитной индукции на дневной поверхности (рис. 3.5 – 3.7).

При исследовании \dot{B}_x какого-либо влияния угла на чувствительность к ВП, как это было в случае x -ой компоненты электрической составляющей поля, не наблюдается (рис. 3.5). Численное моделирование x -ой компоненты вектора производных магнитной индукции над поляризуемым полупространством показало, что при различных углах φ меняется амплитуда сигнала (рис. 3.5а, сплошные кривые). Относительное отклонение сигнала над поляризуемым полупространством от соответствующего отклика от неполяризуемой среды (рис. 3.5а, точечные кривые) составляет несколько процентов и не меняется при изменении азимутального угла. Поэтому зависимость от параметров ВП при любом положении приемника можно считать незначительной. Численные расчеты становления компонент вектора производных магнитной индукции над неполяризуемыми средами не приводятся ввиду нецелесообразности, так как они не имеют визуального отличия от модели с поляризацией как для сигналов, так и для изолиний.

Несмотря на то, что влияние ВП на компоненту \dot{B}_x незначительно для любого положения приемника (для любого азимутального угла φ), некоторые важные моменты стоит отметить. Как известно, магнитное поле имеет слабое распространение при гальваническом возбуждении среды и затухает быстрее электрического, поэтому для построения изолиний будут рассматриваться более ранние временные задержки (рис. 3.5б, в). Изолинии компоненты \dot{B}_x на дневной поверхности, как и в случае E_y , имеет симметричную картину не только относительно осей координат, но и относительно линий $y = x$ и $y = -x$, что хорошо видно на построенных картах (рис. 3.5б, в). На этих линиях находится максимум сигнала (рис. 3.5а,

красная кривая), амплитуда которого зависит от азимутального угла и достигает минимума при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$.

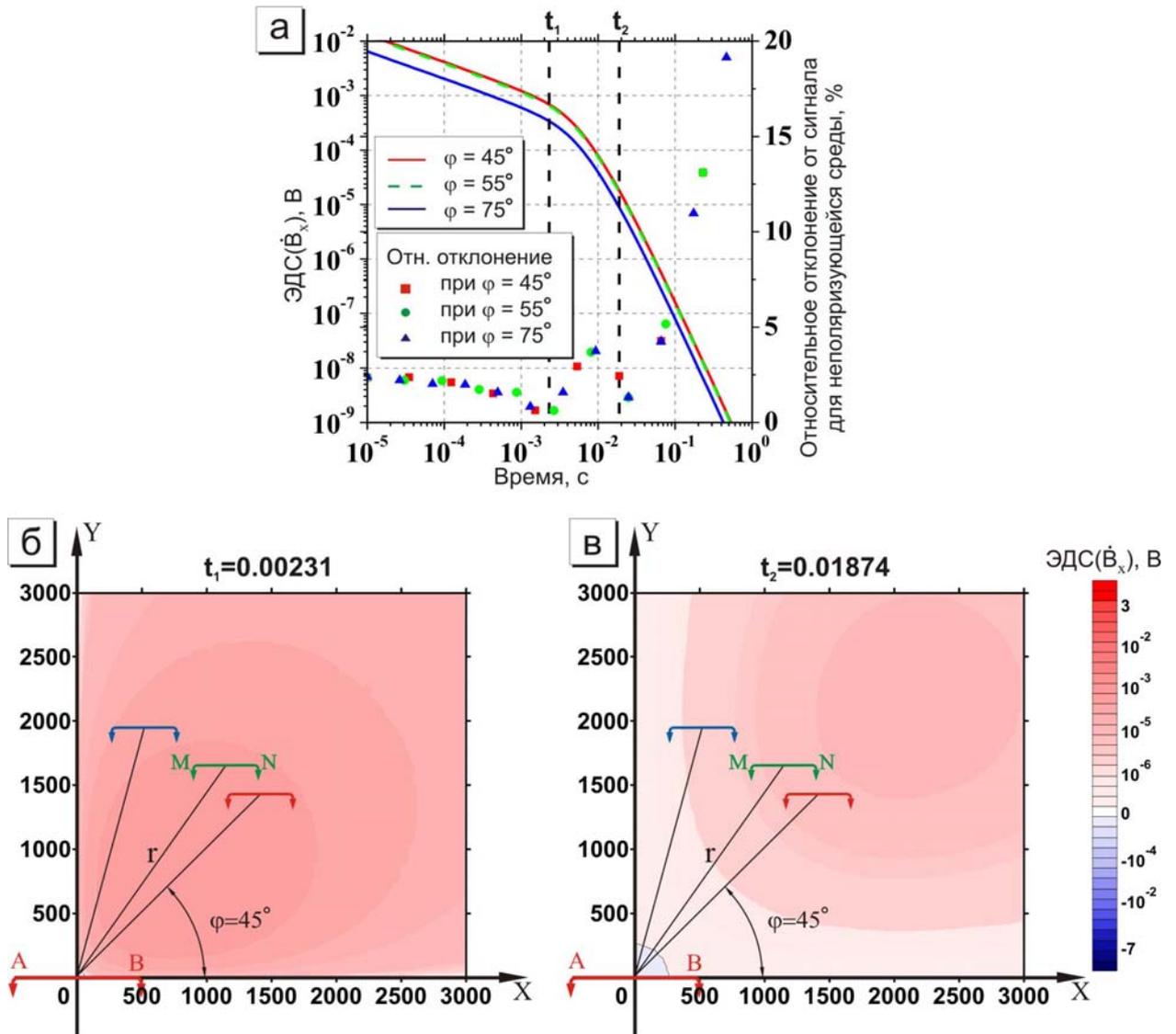


Рис. 3.5. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал \dot{B}_x .

а – синтетические сигналы компоненты \dot{B}_x ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Модель поляризующегося полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.

Установка: $AB = 2000 \text{ м}$, $Q = 2500 \text{ м}^2$.

Моделирование \dot{B}_y (рис. 3.6) также как и в предыдущем случае показывает слабую чувствительность компоненты к ВП для любого азимутального угла φ . На рисунке 3.6а представлены синтетических

переходные характеристики (сплошные кривые) над поляризуемым полупространством для нескольких положений приемника ($\varphi = 15^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 75^\circ$).

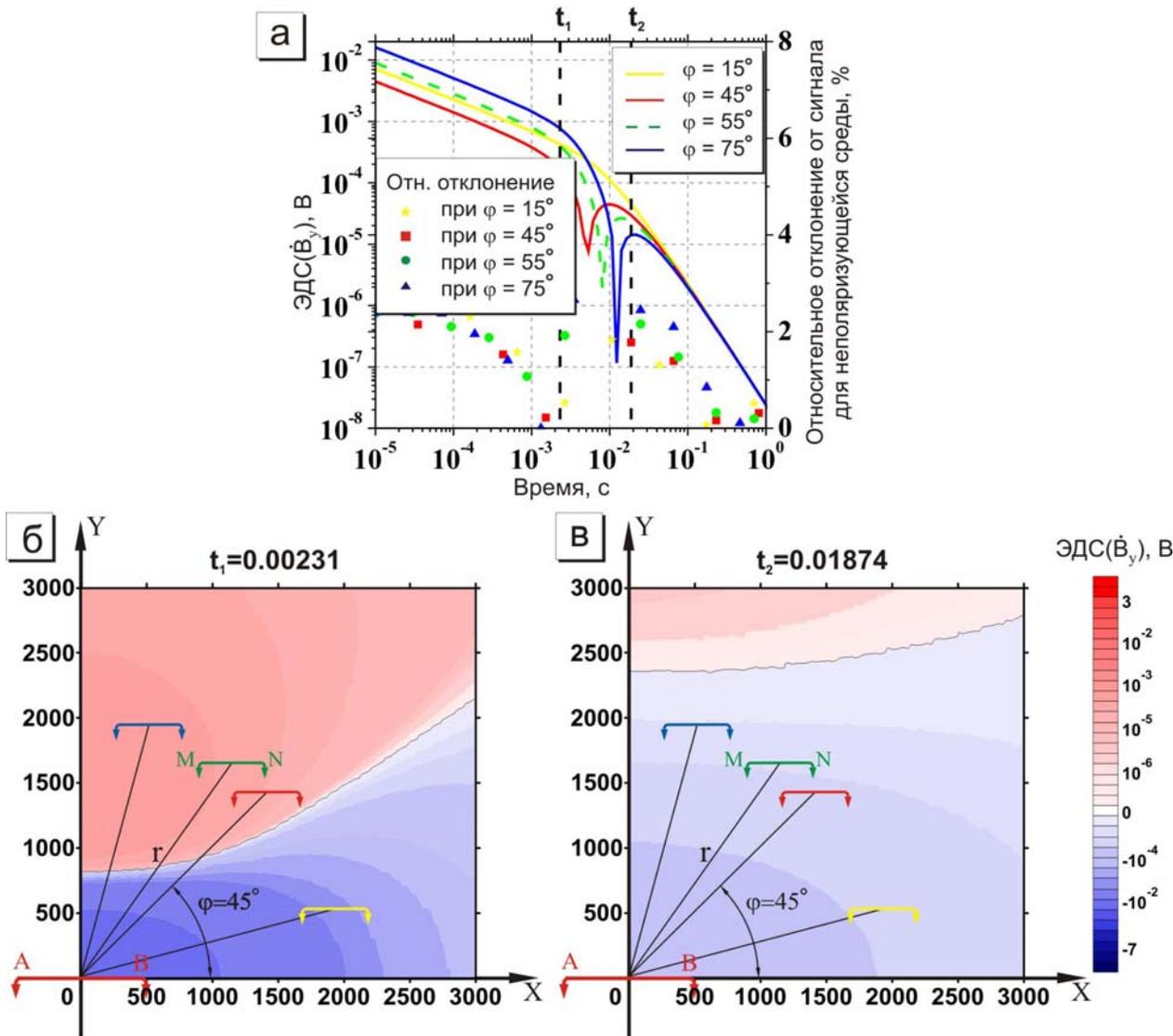


Рис. 3.6. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал \dot{B}_y .

а – синтетические сигналы компоненты \dot{B}_y ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Модель поляризуемого полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.

Установка: $AB = 2000 \text{ м}$, $Q = 2500 \text{ м}^2$.

Относительное отклонение (рис. 3.6а, точечные кривые) представленных сигналов от соответствующих откликов рассчитанных для неполяризуемого полупространства демонстрирует неизменно слабую

чувствительность к ВП для представленных положений приемника (отклонение не превышает 5%).

Карты изолиний имеют, как и в случае с электрической компонентой E_x , две области – монотонного и знакопеременного сигнала (рис. 3.6б, в, красная и синяя область соответственно). Но здесь граница раздела отрицательных и положительных значений сигнала Γ возникает на ранних временах и исчезает на поздних.

Анализ представленных карт (рис. 3.6б, в) изолиний позволяет утверждать, что максимальной амплитудой компонента \dot{B}_y обладает при азимутальных углах 0° и 90° . На рис. 3.6а представлены монотонные сигналы (желтая кривая) и знакопеременные (синяя, красная и зеленая кривые). Итак, можно констатировать изменение формы (знакопеременный и монотонный) и амплитуды сигнала при различных углах φ вместе с неизменно слабой чувствительностью к параметрам ВП компоненты \dot{B}_y .

На рис. 3.7 представлены рассчитанные отклики от поляризующегося полупространства для компоненты \dot{B}_z (рис. 3.7а, сплошные линии) с их отклонениями (рис. 3.7а, точечные кривые) относительно соответствующих сигналов над неполяризующейся средой и рассчитанные изолинии на дневной поверхности (рис. 3.7б, в). Третья компонента вектора производных магнитной индукции, как и две рассмотренные ранее, слабо чувствительна к параметрам ВП. Изменение угла приводит к изменению амплитуды сигнала, максимум которой находится на оси ординат ($\varphi = 90^\circ$), что хорошо видно на построенных картах изолиний (рис. 3.7 а, б). Чувствительность к параметрам поляризации для разных положений приемника остается неизменно низкой.

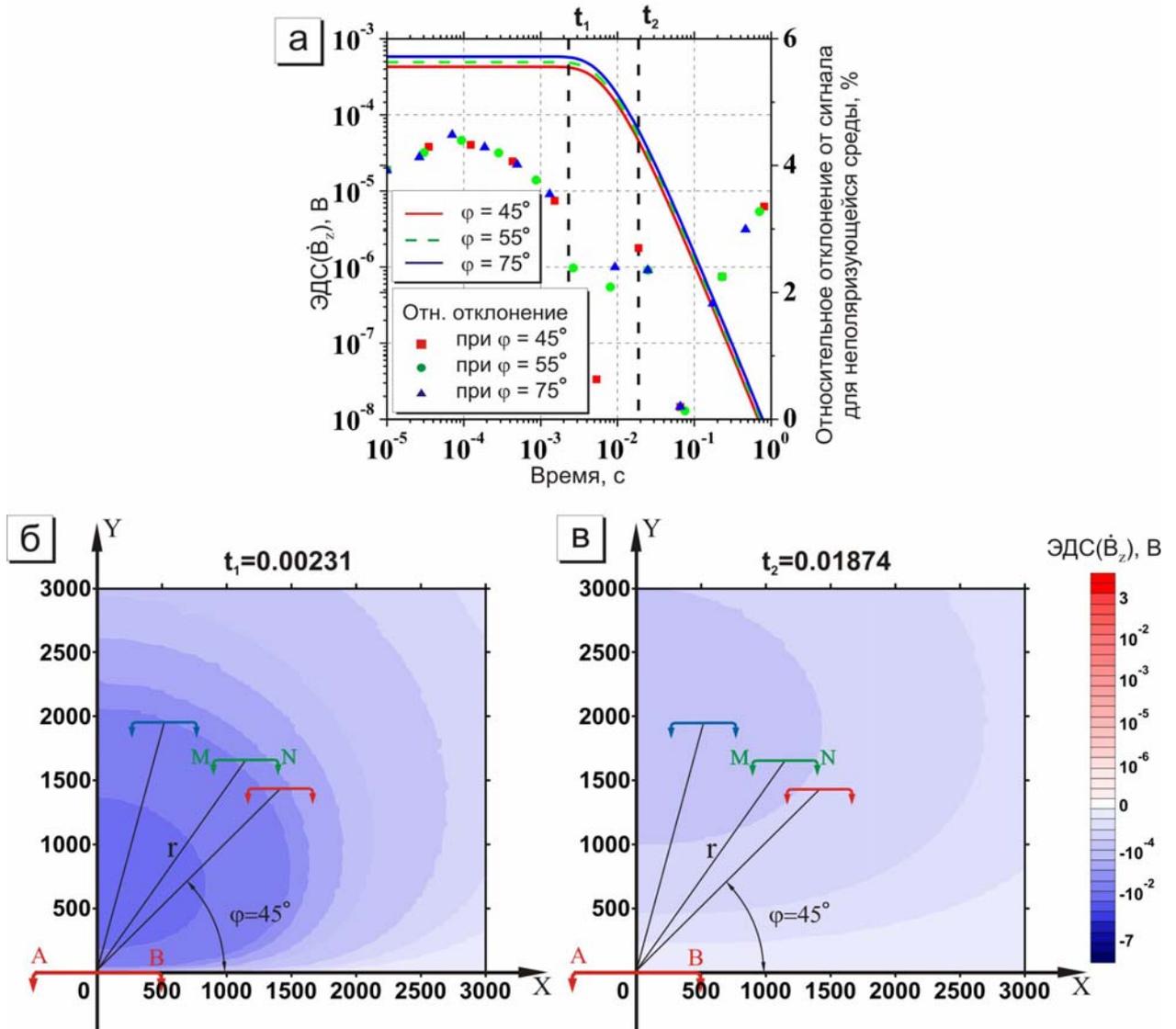


Рис. 3.7. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал \dot{B}_z .

а – синтетические сигналы компоненты \dot{B}_z ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Модель поляризующегося полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.

Установка: $AB = 2000 \text{ м}$, $Q = 2500 \text{ м}^2$.

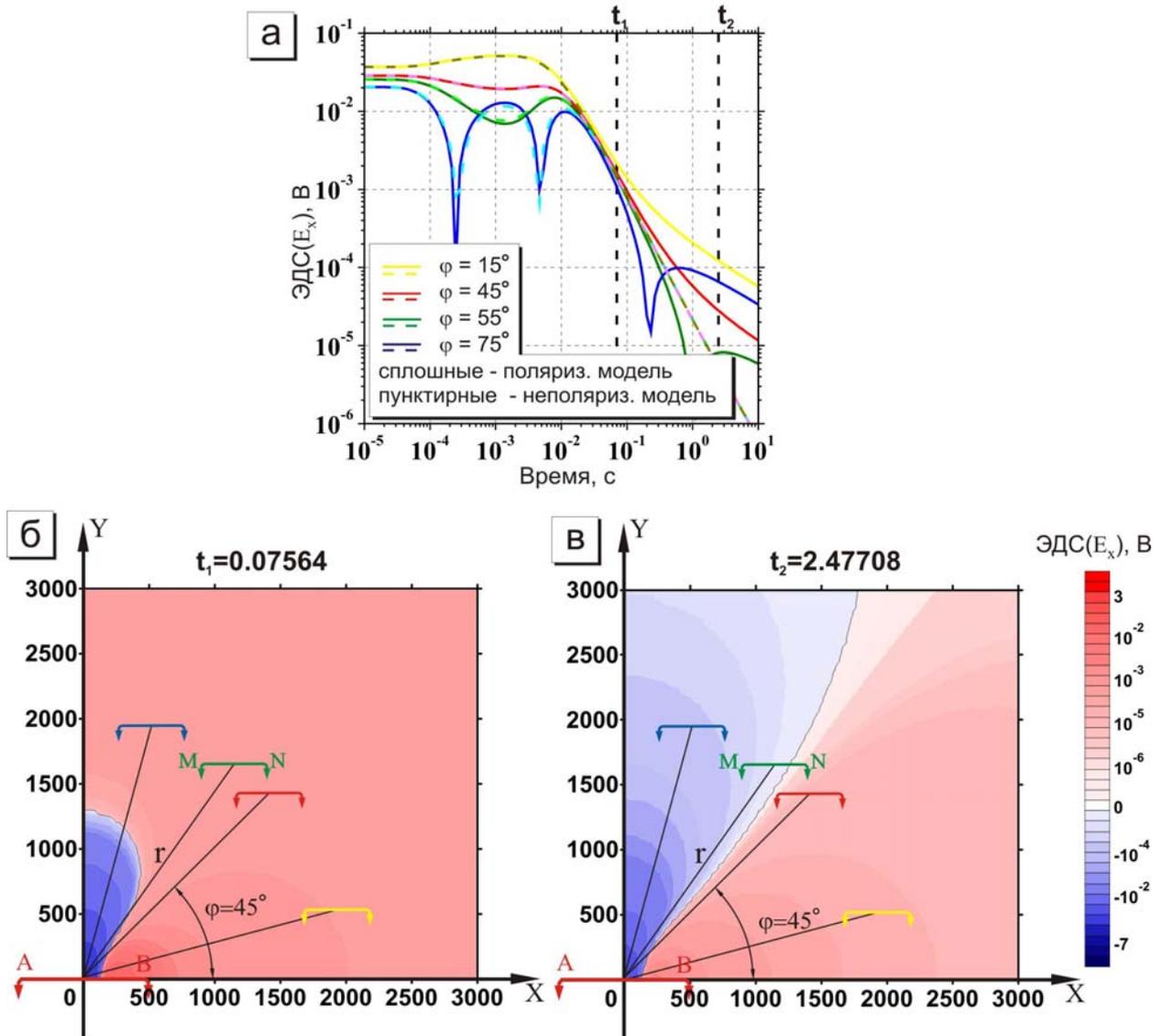
Горизонтально-слоистая среда

Для доказательства выводов, сделанных на основе моделирования сигналов и построения изолиний для полупространства, была проведена имитация для ряда горизонтально-слоистых моделей. Результаты численного моделирования компоненты E_x для одной из тестовых моделей (табл. 3.1) приведены на рисунке 3.8, где представлены сигналы (а) и изолинии E_x (б,в).

Таблица 3.1

Тестовая модель 1

	$\rho, \text{Ом}$	$h, \text{м}$	η	τ	ϵ
1 Слой	100	100			
2 Слой	40	200	0.05	0.02	0.55
3 Слой	80	300	0.02	0.1	0.5
4 Слой	500	∞			

Рис. 3.8. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал E_x .а – синтетические сигналы компоненты E_x ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Тестовая модель 1. Установка: $AB = 2000\text{м}$, $MN = 200\text{м}$.

На рисунке видно, что картина распространения поля на дневной поверхности (изолинии) на рассмотренных временах схожа с изолиниями для поляризующегося полупространства. Однако, если рассмотреть рис. 3.8а, на котором представлены отклики от поляризующейся (сплошные линии) и соответствующей неполяризующейся (пунктирные линии) моделей, можно заметить, что на ранних временах электрическая компонента E_x имеет более сложную форму, чем для полупространства, тем не менее сигнал на поздних временах схож с откликом от полупространства: при определенных углах, кривая повторяет «форму» кривой становления над неполяризующейся средой. Также хорошо видно на изолиниях (рис. 3.8б,в), что на поздних временах, как и при поляризующемся полупространстве, устанавливается граница раздела Γ знакопеременных и монотонных сигналов, которая характеризуется ослабленным влиянием ВП.

Моделирование сигналов и изолиний компоненты E_x для большого набора горизонтально-слоистых моделей позволяет очертить круг ситуаций, при которых наличие границы Γ наиболее очевидно. Геоэлектрический разрез будет описываться такими моделями:

- поляризующегося полупространства;
- поляризующегося слоя, подстилаемого проводящим полупространством;
- погруженного поляризующегося слоя;
- поляризующегося полупространства, перекрытого проводящим слоем.

В остальных случаях кривые становления, как и граница Γ между областями монотонных и знакопеременных сигналов, имеют сложную форму. Поэтому поиск точек с ослабленным влиянием эффектов ВП на сигнал E_x осложняется, а в некоторых случаях становится невозможным. Несмотря на это, окрестность границы Γ монотонных и знакопеременных сигналов

является областью лучшей, по сравнению с традиционными (осевое и экваториальное положение приёмной линии), для отыскания параметров неполяризуемой среды.

Что касается второй электрической компоненты, результаты моделирования которой представлены на рис. 3.9, то в горизонтально-слоистой неполяризуемой среде, в отличие от полупространства, электрическая компонента E_y ненулевая, но быстро затухает (рис. 3.9 а, пунктирные кривые). При введении поляризации затухание данной компоненты замедляется (рис. 3.9 а, сплошные кривые), а отклонение относительно сигнала над неполяризуемой средой превышает 100% и не имеет существенных отличий для разных положений приемника (рис. 3.9а, точечные кривые). При изменении азимутального угла меняется амплитуда сигнала, которая достигает максимального значения при $\varphi = 45^\circ$, а минимального при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Из вышеизложенного следует, что для поляризуемой горизонтально-слоистой модели изолинии E_y имеют схожее строение с изолиниями над полупространством: картина симметрична относительно прямых $y = x$ и $y = -x$, на которых сигнал принимает максимальное значение (рис. 3.9 б, в).

Хотя кривые становления вектора производных магнитной индукции над горизонтально-слоистой средой имеют более сложную форму по сравнению с полупространством, чувствительность к параметрам поляризации остается малой (5-7% на поздних временах) для любого азимутального угла φ . В силу малых изменений результаты моделирования для компонент производных магнитной индукции не приводятся.

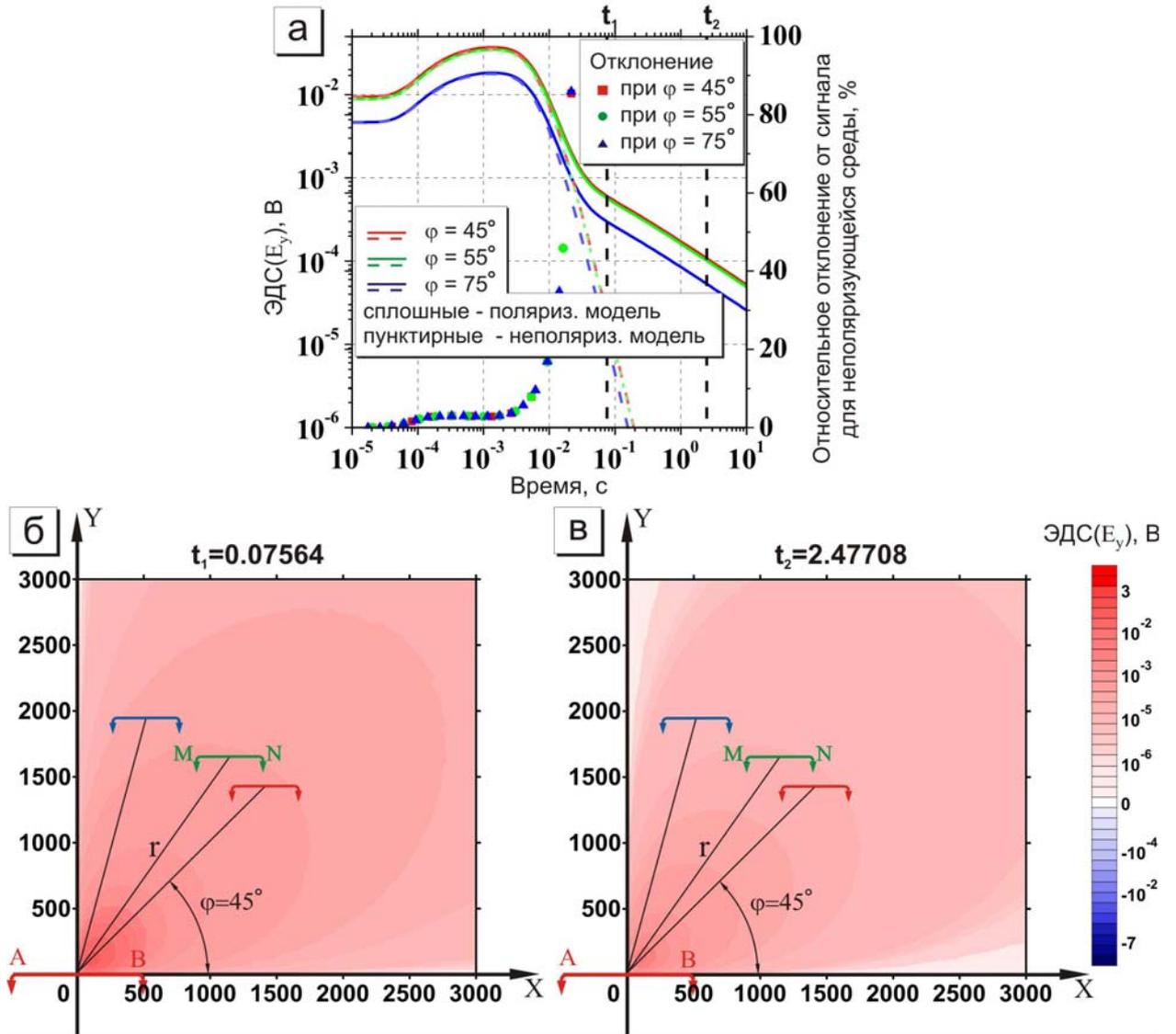


Рис. 3.9. Влияние азимутального угла φ на моделируемый сигнал E_y .

а – синтетические сигналы компоненты E_y ;

б, в – карты изолиний поля на фиксированной временной задержке.

Тестовая модель 1. Установка: $AB = 2000\text{ м}$, $MN = 200\text{ м}$.

Таким образом, установлено, что сигнал электрической компоненты E_x при гальваническом возбуждении среды имеет качественные отличия для разных азимутальных углов: существуют положения приемника, где сигнал имеет знакопеременное затухание, угловые сектора, где сигнал имеет монотонную форму и сектора с ослабленной чувствительностью к ВП. При исследовании компоненты E_y и вектора производных магнитной индукции

$(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$ каких-либо качественных изменений переходных характеристик для разных азимутальных углов не обнаружено: от положения приемника зависит уровень сигнала. Стоит отметить, что для получения максимально возможной амплитуды сигнала необходимо использовать азимутальные углы: $\varphi = 45^\circ$ для E_y, \dot{B}_x , $\varphi = 90^\circ$ для \dot{B}_y, \dot{B}_z .

Значимым является тот факт, что при измерениях параллельной гальванической установкой (источник и приемник – параллельные электрические линии) существует граница раздела знакопеременных и монотонных сигналов Γ , которая проходит через точки пространства, где влияние вызванной поляризации ослаблено. Несомненно, отмеченный факт должен использоваться при решении задачи разделения процессов поляризации и становления. Что, в свою очередь, гарантирует повышение информативности метода и качества интерпретации данных ЗС, полученных в условиях, осложненных ВП. Поэтому требуется более детальное изучение сигнала гальванической установки.

3.2. Аналитическое обоснование существования оптимальной комбинации углов измерительной системы (на примере поляризующегося полупространства)

В данном разделе на примере поляризующегося полупространства приводится аналитическое объяснение существования точек пространства с ослабленным влиянием ВП. Источник возбуждения поля - горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ), приемник - горизонтальная электрическая линия (рис. 3.10). Выбору такой измерительной системы предшествовало численное моделирование переходного процесса всех компонент электрического и магнитного полей, возбуждаемых в поляризующейся среде электрической линией, проведенное выше (см. раздел 3.1).

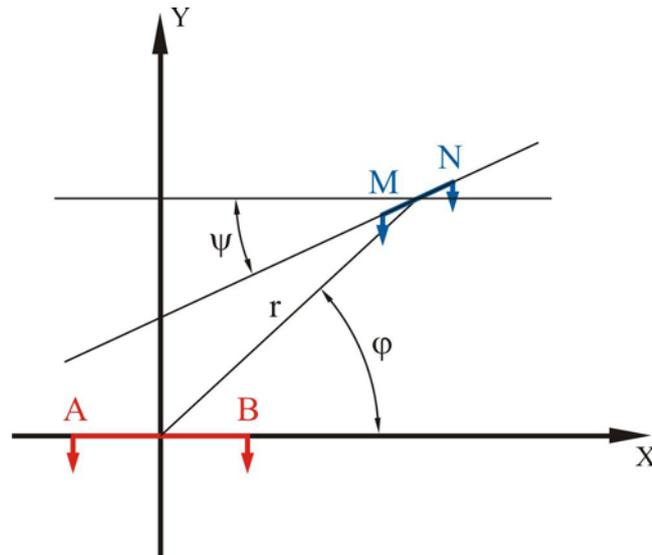


Рис. 3.10. Схема гальванической измерительной установки $ABMN$ в общем случае.

Напомним, что расчеты полей для различных моделей поляризующихся слоистых сред показали, что сигналы, измеряемые установкой $ABMN$, обладают особенностью. На карте изолиний для поздних времен становления поля всегда присутствуют две области, соответствующие положительным и отрицательным значениям сигналов, разделенные границей, где влияние вызванной поляризации ослаблено. Поэтому представляется важным выяснить, в какой мере и почему положение приемной линии позволяет снизить влияние ВП. Это удобно сделать на примере поля поляризующегося полупространства, для которого имеется аналитическое представление.

Переходя непосредственно к изучению влияния положения приемника на сигнал, стоит помнить, что в однородном неполяризующемся изотропном полупространстве нестационарное электрическое поле не зависит от угла φ . В поляризующемся полупространстве это не так. Сначала рассмотрим случай параллельной установки $\psi = 0$. В этом случае переходная характеристика будет зависеть только от нормальной составляющей $E_{\parallel}(t)$ и для режима "выключения" связана с частотной характеристикой интегральным

преобразованием Фурье, которое может быть записано в комплексной форме [Вешев, 1980]:

$$E(t) = E_{\parallel}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\parallel}(\omega) e^{-i\omega t} \frac{d\omega}{-i\omega},$$

либо как синус- или косинус-трансформации:

$$E_{\parallel}(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Im}[E_{\parallel}(\omega)] \frac{\cos \omega t}{\omega} d\omega = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}[E_{\parallel}(\omega)] \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega.$$

Частотная характеристика $E_{\parallel}(\omega)$, описывается выражением:

$$E_{\parallel}(\omega) = \frac{I_x dl}{2\pi r^3} \left[(3 \cos^2 \varphi - 2) + (1 + kr) e^{-kr} \right] \rho(\omega),$$

где: $k^2 = -i\omega\mu_0 / \rho(\omega) = -i\omega\mu_0\sigma(\omega)$. Чтобы установить, каким образом угол φ между моментом питающего диполя и направлением на приёмник влияет на чувствительность системы наблюдения к ВП, рассмотрим низкочастотное разложение для мнимой части выражения $E_{\parallel}(\omega)$:

$$\begin{aligned} \text{Im}[E_{\parallel}(\omega)]|_{kr \ll 1} &\approx \text{Im} \left[\frac{I_x dl}{2\pi r^3} \left(3 \cos^2 \varphi - 1 - \frac{k^2 r^2}{2} \right) \rho(\omega) \right] = \\ &= \left\{ \frac{I_x dl}{2\pi r^3} (3 \cos^2 \varphi - 1) \text{Im}[\rho(\omega)] \right\} - \frac{I_x dl \omega \mu_0 r^2}{4\pi r^3} \text{Re}[\rho(\omega)] \text{Im}[\rho(\omega)]. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Отсюда видно, что зависимость от азимутального угла обеспечивается первым слагаемым в фигурных скобках в выражении (3.1). Из уравнения

$3\cos^2\varphi - 1 = 0$ получаем, что при $\varphi = \arccos\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 54.7^\circ$ влияние низкочастотной дисперсии удельного сопротивления полупространства минимально.

Если установка имеет общий вид (рис. 3.10), когда угол $\psi \neq 0$, то в измеряемом поле появится тангенциальная составляющая $E_{\perp}(\omega)$, частотная характеристика которой описывается выражением:

$$E_{\perp}(\omega) = \frac{3I_x dl}{2\pi r^3} \rho(\omega) \cos\varphi \sin\varphi.$$

Аналогично случаю с параллельной установкой рассматривается низкочастотное разложение для мнимой части выражения:

$$\operatorname{Im}[E_{\perp}(\omega)]|_{kr \ll 1} \approx \operatorname{Im}\left[\frac{3I_x dl}{2\pi r^3} \rho(\omega) \cos\varphi \sin\varphi\right] = \frac{3I_x dl}{2\pi r^3} \cos\varphi \sin\varphi \operatorname{Im}[\rho(\omega)].$$

Тогда выражение для мнимой части низкочастотного разложения для полного поля $E(\omega) = E_{\parallel}(\omega)\cos\psi + E_{\perp}(\omega)\sin\psi$ примет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}[E(\omega)] &= \operatorname{Im}[E_{\parallel}(\omega)\cos\psi + E_{\perp}(\omega)\sin\psi] = \\ &= \frac{I_x dl}{2\pi r^3} \left\{ (3\cos^2\varphi - 1)\cos\psi + 3\cos\varphi\sin\varphi\sin\psi \right\} \operatorname{Im}[\rho(\omega)] - \\ &\quad - \frac{I_x dl \omega \mu_0 r^2}{4\pi r^3} \cos\psi \operatorname{Re}[\rho(\omega)] \operatorname{Im}[\rho(\omega)]. \end{aligned}$$

Здесь зависимость от азимутального угла также определяется первым слагаемым. Поэтому нахождением частных решений уравнения $(3\cos^2\varphi - 1)\cos\psi + 3\sin\varphi\cos\varphi\sin\psi = 0$ можно определить комбинацию углов гальванической зондирующей системы, при которой влияние ВП

минимально. В частности, для часто используемого на практике азимутального угла $\varphi = 45^\circ$ получаем $\psi = -\arctg \frac{1}{3} = -18,4^\circ$.

Из вышеизложенного следует, что установленное свойство отклика поляризуемого полупространства целиком определяется взаимным расположением питающего и приёмного диполей, а не значениями параметров формулы Cole-Cole и сопротивления. Поэтому при работе с реальной измерительной установкой пространственное расположение точек ослабленной ВП (граница Γ) будет зависеть от размеров элементов установки и исследуемой геологической среды. Также очевидно, что размеры установки влияют на значение углов φ и ψ , но принципиально важно существование таких комбинаций, которые ослабляют или подчеркивают эффекты ВП на измеряемом сигнале.

Доказанное существование комбинаций углов, которые позволяют существенно понизить влияние ВП, было еще раз подтверждено моделированием распространения поля на дневной поверхности над поляризуемым полупространством и соответствующих сигналов для найденных оптимальных расстановок системы измерения. На рис. 3.11а представлены изолинии поля параллельной гальванической установки на выбранной временной задержке для среды с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и характерными для осадочных ионопроводящих пород параметрами поляризации: $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$. Зеленая линия соответствует оптимальному азимутальному углу $\varphi = 54,7^\circ$, при котором зондирования будут меньше всего зависеть от эффектов ВП. Кривая совпадает с границей Γ раздела знакопеременных (синяя область) и монотонных (красная область) сигналов. Также изображена оптимальная схема измерительной системы, для которой сигнал (рис. 3.11б, красные звездочки) совпадает с откликом от

неполяризуемой среды с сопротивлением $80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (рис. 3.11б, черная кривая).

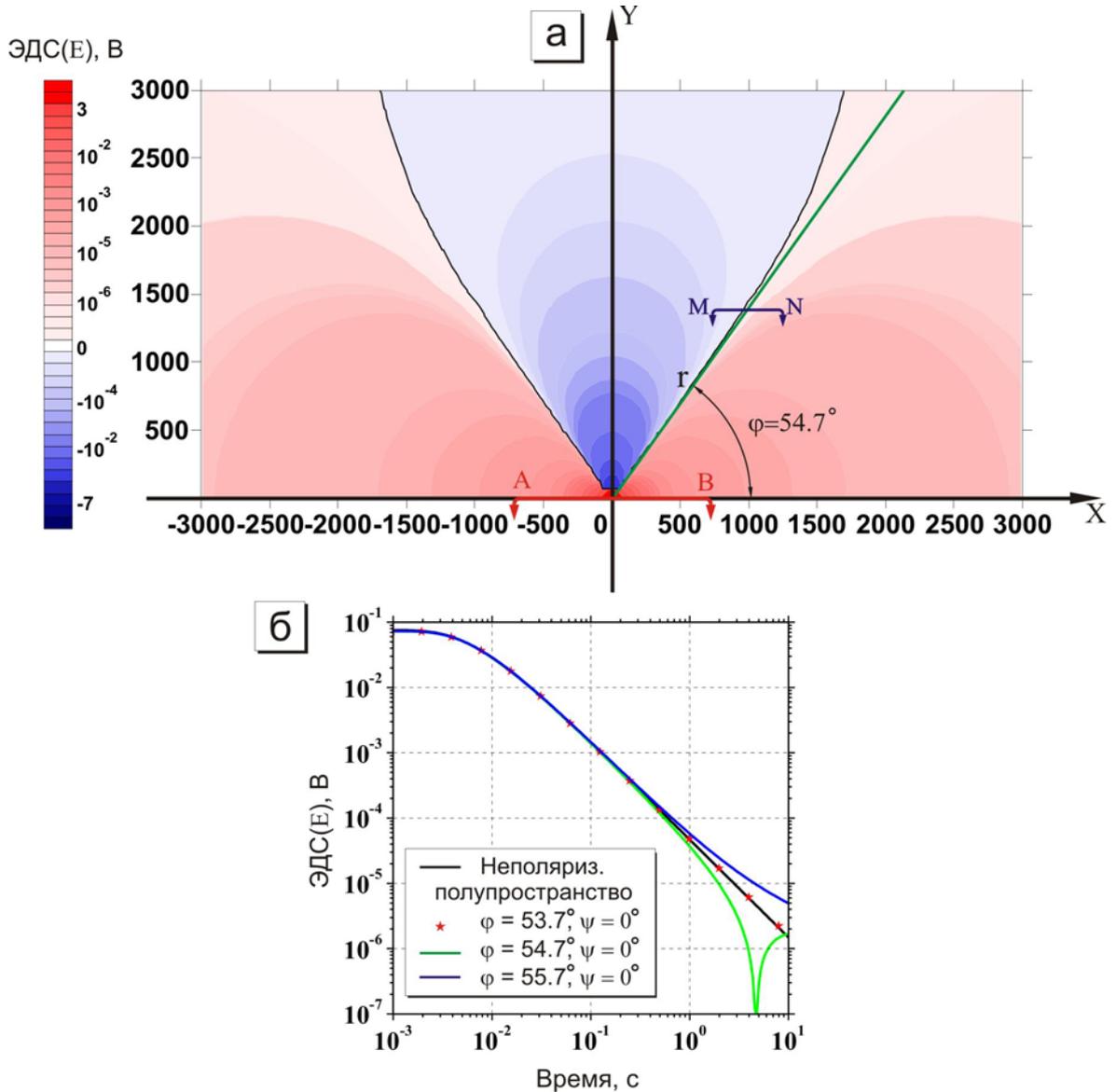


Рис. 3.11. Моделирование переходного процесса для гальванической установки с оптимальной комбинацией углов: $AB = 2000 \text{ м}$, $MN = 200 \text{ м}$.
 Модель поляризуемого полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01 \text{ с}$, $c = 0.5$.
 а – карта изолиния на фиксированной временной задержке;
 б – синтетические переходные характеристики.

Помимо имитации зондирования в точке на границе Γ , приведены кривые становления для азимутальных отклонений относительно положений на границе Γ на $+1^\circ$ (рис. 3.11б, синяя кривая) и -1° (рис. 3.11б, зеленая

кривая). Видно, что даже при небольших отклонениях азимутального угла ($\pm 1^\circ$) возникают значительные изменения становления поля (до 100% и больше) на поздних временах.

На рис. 3.12 представлены изолинии поля и сигналы для второго разобранного случая оптимальной установки: часто используемый на практике азимутальный угол $\varphi = 45^\circ$ и рассчитанный угол $\psi = -18,435^\circ$. При имитации использовалась упомянутая в первом случае модель полупространства: $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$. Зеленая линия на карте изолиний соответствует азимутальному углу $\varphi = 45^\circ$ (рис. 3.12а). Как хорошо видно, эта прямая совпадает с прямолинейным участком границы Г, что подтверждает верность выполненных расчетов. Сигнал для рассмотренной оптимальной установки (рис. 3.12б, красные звездочки) совпадает с сигналом от неполяризуемого полупространства с тем же сопротивлением – $80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (рис. 3.12б, черная кривая). Это еще раз доказывает существование комбинаций углов, позволяющих понизить влияние ВП на нестационарные измерения. На рис. 3.12б также представлены сигналы с отклонением угла ψ на $+1^\circ$ (синяя кривая) и -1° (зеленая кривая). Как и в случае параллельной установки, где исследовался азимутальный угол φ , малые неточности при задании угла ψ ($\pm 1^\circ$) приводят к значительным отклонениям сигнала на поздних временах относительно отклика для оптимальной установки (100% и больше).

Если проанализировать карту изолиний установки общего типа ($\psi \neq 0$) (рис. 3.12а), можно обнаружить, что в отличие от случая параллельной установки (рис. 3.11а), картина распространения поля на дневной поверхности не является симметричной относительно оси ординат. Происходит поворот изолиний относительно координатного центра, вместе с тем меняется множество точек с ослабленным влиянием ВП – граница Г. Поэтому вращением вокруг центра приемной линии с фиксированным

азимутальным углом можно наблюдать поле так, чтобы граница Γ совпадала с положением приемника, что и было сделано для $\varphi = 45^\circ$. Это еще раз подтверждает существование оптимальной комбинации углов гальванической измерительной установки, которая позволяет существенно подавить поляризационную составляющую нестационарного сигнала.

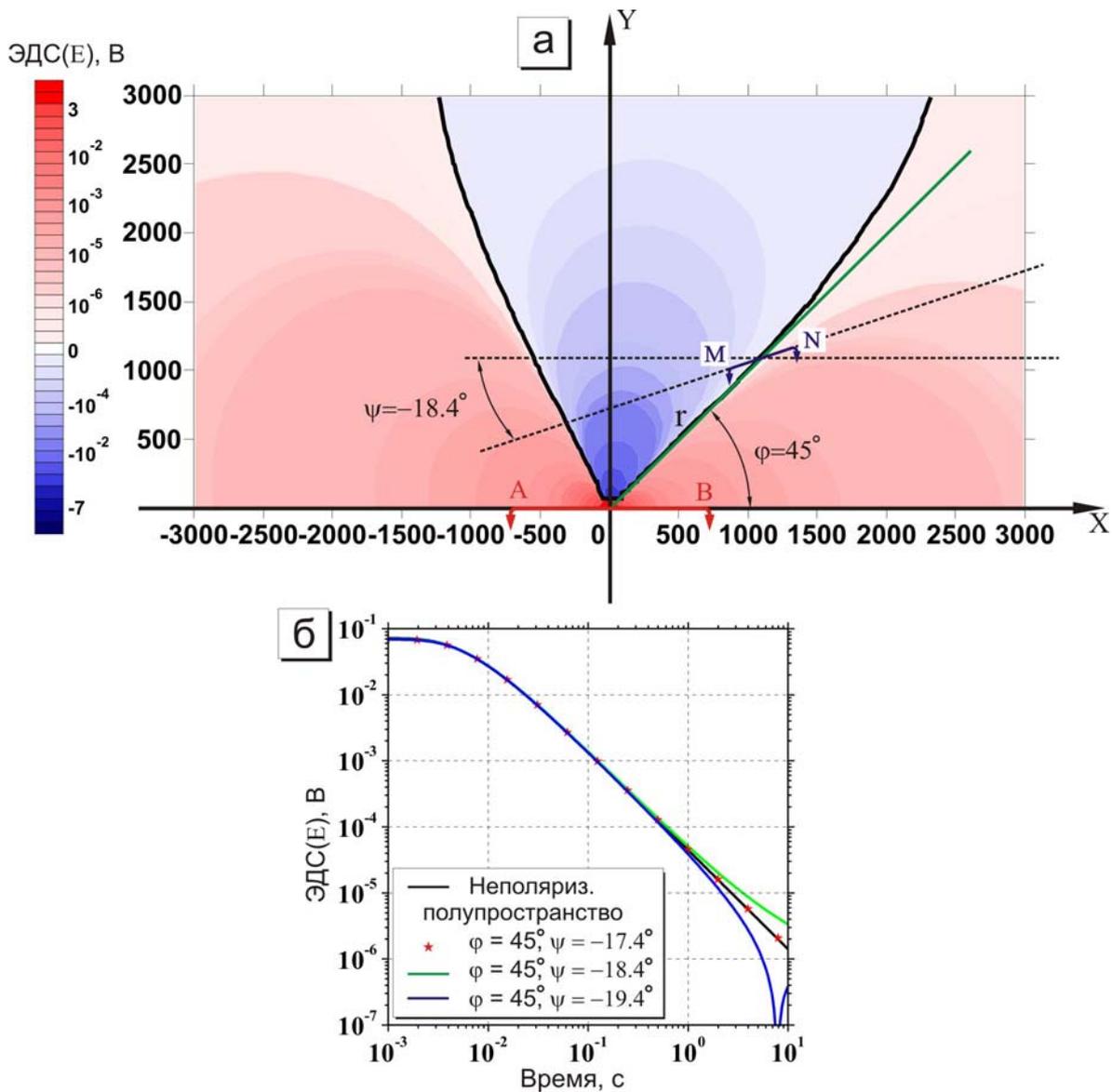


Рис. 3.12. Моделирование переходного процесса для гальванической установки с оптимальной комбинацией углов: $AB = 2000\text{ м}$, $MN = 200\text{ м}$.
 Модель поляризующегося полупространства: $\rho = 80\text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\eta = 0.05$, $\tau = 0.01\text{ с}$, $c = 0.5$.
 а – карта изолиния на фиксированной временной задержке;
 б – синтетические переходные характеристики.

Помимо приведенного примера, было выполнено численное моделирование распространения поля над средами различных типов для установок общего вида. Все установленные особенности сохраняются. Но стоит отметить, что использование гальванических систем зондирования (в особенности малых размеров – источник и разнос до 500 м) для изучения поляризующихся сред предъявляет повышенные требования к точности их пространственного расположения: малые отклонения от оптимальных углов φ и ψ приводят к значительным изменениям измеряемого сигнала.

Таким образом, на примере поляризующегося полупространства аналитически показано, что при нестационарных зондированиях гальванической установкой существуют точки пространства с ослабленным влиянием ВП. Установлено, что изменение углов гальванической системы измерения является инструментом для ослабления влияния ВП на измеряемый нестационарный сигнал. Этот важный результат делает возможным разделение электродинамической и поляризационной составляющей отклика. Но остается неисследованным вопрос поиска оптимальной конфигурации измерительной системы.

3.3. Разработка способов поиска оптимальной конфигурации измерительной системы

Возможность подавления влияния ВП на нестационарный сигнал при гальванических измерениях позволяет достаточно уверенно восстанавливать строение проводящего неполяризующегося разреза. Остается определить наиболее эффективный способ поиска оптимальной системы измерения. В данном разделе рассмотрены некоторые способы конфигурирования измерительной установки, позволяющие в абсолютном выражении минимизировать поляризационную составляющую измеряемого сигнала.

Способ 1. Изменение азимутального угла при фиксированном разnose

Фиксируется разнос установки и варьируется азимутальный угол, задающий направление от оси питающей линии на центр приемной линии (рис. 3.13а). Центр приёмной линии перемещается по дуге L_φ . Для обнаружения и анализа зон ослабленного проявления ВП в различных моделях важно решить задачу определения геометрического места точек, образующих границу Γ , средствами математического моделирования. При азимутальном перемещении приёмника поиск координат границы Γ сводится к проблеме минимизации функционала вида:

$$\Phi_{L_\varphi}(r, \varphi) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f(m(0), r, \varphi) - f(m(\omega), r, \varphi)}{f(m(0), r, \varphi)} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Здесь (r, φ) - полярные координаты точки измерения, $m(0)$ - модель слоистой проводящей неполяризуемой среды (без ВП), $m(\omega)$ - модель слоистой проводящей поляризуемой среды, $f(m(0), r, \varphi)$, $f(m(\omega), r, \varphi)$ - решения прямых задач для моделей $m(0)$ и $m(\omega)$ соответственно. Решением задачи будет функция: $\varphi_\Gamma(r) = \min_{\varphi \in [0, \frac{\pi}{2}]} \Phi_{L_\varphi}(r, \varphi)$.

Способ 2. Перемещение приемной линии параллельно источнику

Приемник перемещается параллельно источнику при фиксированном значении ординаты, линия L_x (рис. 3.13б). Минимизируемый функционал в задаче поиска точек, образующих границу Γ , в этом случае примет вид:

$$\Phi_{L_x}(x, y) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f(m(0), x, y) - f(m(\omega), x, y)}{f(m(0), x, y)} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где (x, y) - декартовы координаты центра приёмной линии. Решением задачи являются координаты точки пересечения центра приёмной линии (MN) и границы областей качественно различных сигналов Γ :

$$x_{\Gamma}(y) = \min_{x \in [0, \infty)} \Phi_{L_x}(x, y).$$

В случае непараллельной установки можно применять такие же схемы, но с условием, что угол ψ будет постоянным. Картина поля на дневной поверхности будет неизменной, и радиальное или параллельное перемещение приёмной линии неизбежно приведут к пересечению с искомой границей Γ .

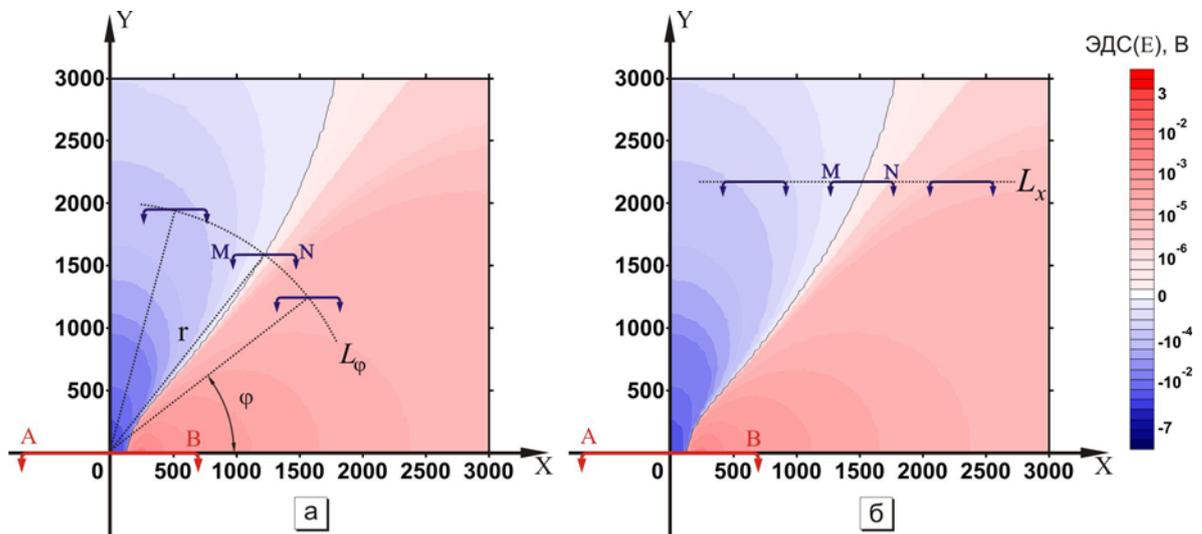


Рис. 3.13. Карты изолиний гальванической установки над поляризующимся полупространством ($\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$) и схемы поиска оптимальной системы измерения.

а – радиальное перемещение; б – параллельное перемещение приёмной линии.

Способ 3. Изменение угла ψ при фиксированном положении приемника

Поворот изолиний поля при изменении угла ψ , а вместе с тем и множества точек с ослабленным влиянием ВП (граница Γ), показанный в разделе 3.2, лежит в основе третьего способа поиска оптимальной конфигурации измерительной системы (рис. 3.14). В этом случае угол

$\psi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right) = L_{\psi}$ для конкретного положения центра приёмной линии (r, φ) в

полярных координатах находится минимизацией функционала:

$$\Phi_{L_\psi}(\psi, r, \varphi) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f(m(0), \psi, r, \varphi) - f(m(\omega), \psi, r, \varphi)}{f(m(0), \psi, r, \varphi)} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Здесь, в отличие от первых двух способов, решением будет множество углов ψ , заданное следующим образом: $\psi(r, \varphi) = \min_{\psi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)} \Phi_{L_\psi}(\psi, r, \varphi)$. По

анalogии можно составить функционал для декартовых координат.

На рис. 3.14 отражен третий способ поиска оптимальной системы измерения: приведена карта изолиний поля для параллельной гальванической установки над поляризующимся полупространством с параметрами $\rho = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$ (рис. 3.14а). Хорошо видно, что при азимутальном угле $\varphi = 45^\circ$ центр измерительной линии не совпадает с границей областей Г качественно различных сигналов. Если же приемную линию развернуть на угол $\psi = -18,4^\circ$ (рис. 3.14б), то картина распространения измеряемого поля на дневной поверхности изменится, а точка измерения (центр MN) попадает на границу Г. Влияние ВП на сигнал в этом случае будет минимальным, а гальваническая измерительная система – оптимальной для разделения поляризационной и электродинамической составляющей отклика, что и требовалось получить.

Если иметь в виду полевые измерения, второй и третий способ более предпочтительны. Это связано с тем, что в окрестности искомой оптимальной точки высока чувствительность к небольшим отклонениям приемной линии от "правильного" положения. Ясно, что разметить и провести измерения по профилю и вращать линию вокруг своей оси намного проще, чем выполнять азимутальные перемещения приемной линии, выверяя положение с необходимой в данной ситуации точностью позиционирования измерительной системы. Также на практике стоит учитывать, что на положение границы Г влияют как геометрические размеры установки, так и

параметры модели, в частности мощность проводящего неполяризуемого слоя в двухслойной модели [Антонов, Шеин, 2008].

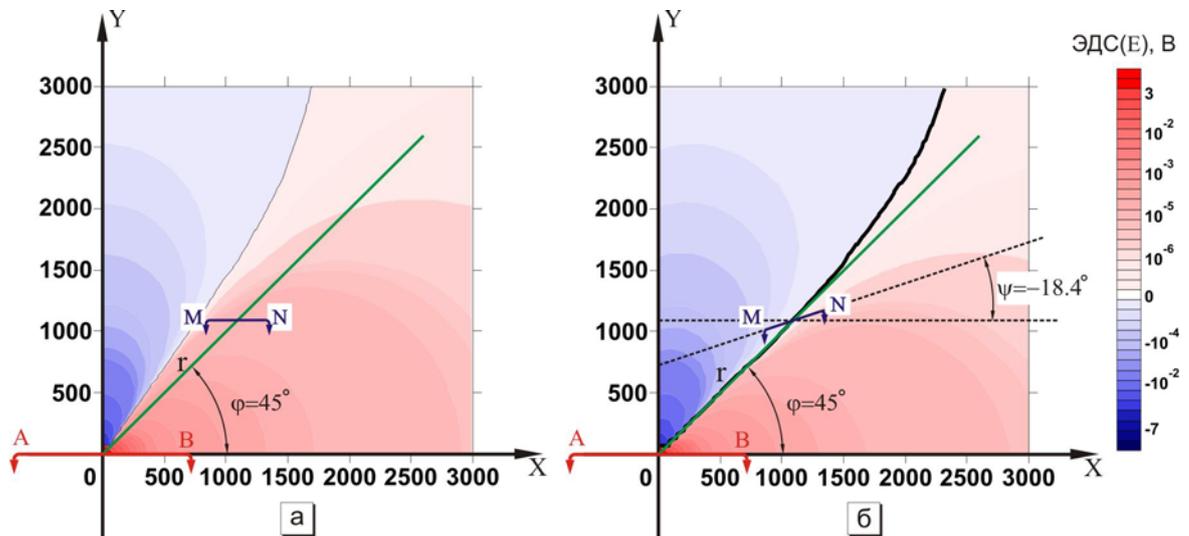


Рис. 3.14. Карты изолиний гальванической установки над поляризуемым полупространством ($\rho = 80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\eta = 0,05$; $\tau = 0,01 \text{ с}$; $c = 0,5$) и схема поиска оптимальной системы измерения.

а – параллельная установка с заданным углом $\varphi = 45^\circ$;

б – оптимальная установка: $\psi = 18,4$ при $\varphi = 45^\circ$.

Таким образом, на примере поляризуемого полупространства поставлены и решены оптимизационные задачи, позволяющие в абсолютном выражении минимизировать поляризационную составляющую измеряемого сигнала. Каждая из этих задач соответствует отдельному способу поиска оптимальной гальванической системы измерения, из которых наиболее предпочтительными для практического применения являются второй (перемещение по параллельному профилю) и третий (вращение приемника).

3.4. Разделение поляризационной и электродинамической составляющей нестационарного сигнала выбором оптимальной конфигурации системы (по результатам полевых экспериментов)

Чтобы проверить эффективность разработанных способов нахождения области ослабленного влияния ВП на параллельную гальваническую установку, были проведены полевые эксперименты. Измерения проводились

на упомянутых во второй главе объектах: 1) в 10 км от северо-восточной окраины Новосибирска (глиняный карьер); 2) на берегу Обского водохранилища в 5 км от пос. Верх-Ирмень (Новосибирская область, Ордынский район). Использовалась параллельная гальваническая установка с питающей линией $AB = 100$ м и приемной линией $MN = 50$ м.

При решении обратной задачи (инверсии) применялся математический аппарат, описанный в разделе 2.4: алгоритмы расчета установившегося поля произвольного дипольного источника на дневной поверхности [Табаровский, 1975, Табаровский, Соколов, 1982; Эпов, Антонов, Ельцов И.Н., 1990] и метод нелинейной минимизации Нелдера-Мида. Минимизировался функционал среднеквадратичного отклонения:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{f^{\text{экспер.}}(t_i) - f^{\text{модел.}}(t_i)}{f^{\text{экспер.}}(t_i)} \right)^2}.$$

Здесь $f^{\text{экспер.}}(t)$ - экспериментальная э.д.с., $f^{\text{модел.}}(t)$ - модельная э.д.с., N - количество временных отсчётов. Определяются параметры поляризующейся модели: $\rho_i, h_i, \eta_i, \tau_i, c_i$, $i = 1, \dots, m$, где m - количество слоев. Качество инверсии переходных характеристик оценивалось по величине СКО.

Для поиска положения приемной линии с ослабленным влиянием ВП в полевых экспериментах использовался первый способ, описанный в разделе 3.1: фиксируется разнос установки и варьируется азимутальный угол. На рис. 3.15 представлены экспериментальные кривые, отражающие изменения сигналов при разных азимутальных углах: а – глиняный карьер, б – пос. Верх-Ирмень. Как можно видеть, результаты полевых измерений и математического моделирования сигналов в целом согласуются. Распределение на дневной поверхности, параллельной источнику, электрической компоненты поля имеет области монотонного и

знакопеременного сигнала, а следовательно и границу этих областей, характеризующуюся ослабленным проявлением ВП. Перейти к подробному анализу каждого случая.

Глиняный карьер. На территории, прилегающей к глиняному карьеру, были выполнены измерения установкой линия – линия ($AB = 100 \text{ м}$, $MN = 50 \text{ м}$). Для поиска положения приемной линии с ослабленным влиянием ВП использовался разнос установки $r = 77 \text{ м}$ и варьировался азимутальный угол $\varphi = 20^\circ, 31^\circ, 45^\circ, 60^\circ$. На рис. 3.15а видно, что при азимутальных углах 20° и 31° сигнал имеет монотонный вид, а при 45° и 50° - переходит через ноль. Это подтверждает, ранее сделанный вывод, что отклики поляризующейся среды, измеряемые при различных азимутальных углах, имеют характерные особенности, установленные при выполнении численных экспериментов.

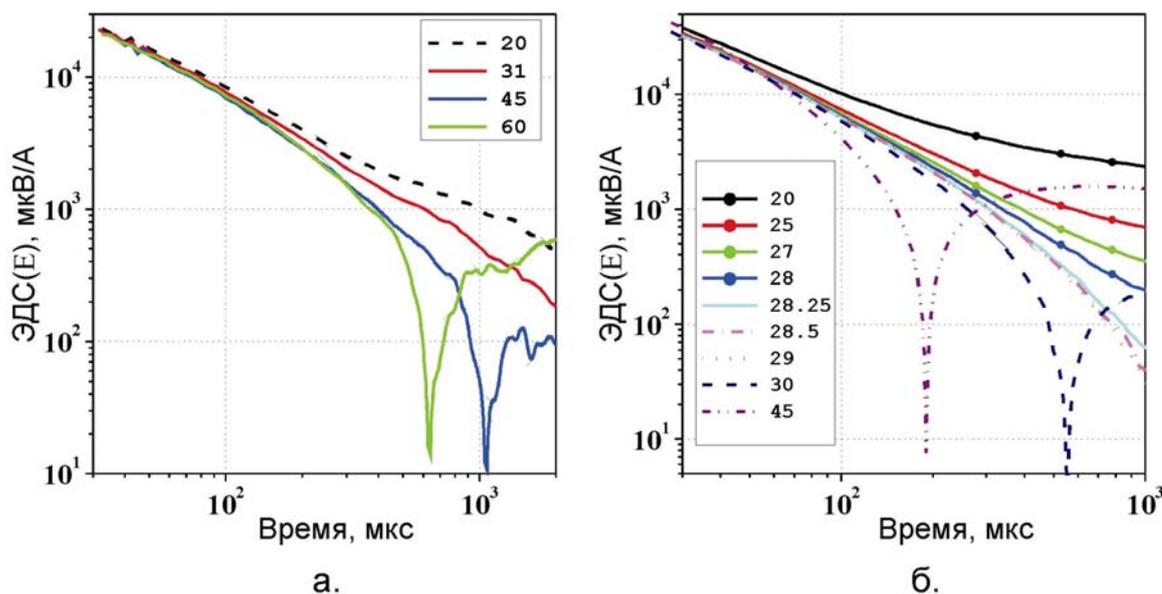


Рис. 3.15 Экспериментальные кривые, демонстрирующие поведение сигналов при изменении азимутального угла. Шифр кривых – значения углов, а – глиняный карьер, б – п. Верх-Ирмень.

При инверсии предполагалось, что измерение с наименьшими проявлениями эффекта вызванной поляризации было выполнено установкой с азимутальным углом 31° . Это подтвердилось с хорошей точностью. Результаты подбора – модель проводящей неполяризующейся среды для данной точки зондирования – представлены в табл. 3.2, а соответствующие кривые экспериментальной и модельной э.д.с. и их относительного отклонения – на рис. 3.16а. Полученная модель (табл. 3.2) использовалась в качестве базовой при интерпретации данных зондирования с учётом ВП. Это позволило проинтерпретировать результаты измерений для установок с азимутальными углами приёмных линий 45° , 20° и 31° . Для каждого случая были определены непротиворечивые представлениям об объекте параметры поляризации. После согласования результатов инверсии всех кривых становления получена единая модель (табл. 3.3). Максимальное среднеквадратическое отклонение составляет 0.09. Результирующие графики экспериментальных и модельных э.д.с. и их относительные отклонения в процентах представлены на рис. 3.16б и 3.16в.

Таблица 3.2

Глиняный карьер.

Результат инверсии данных в точке зондирования со слабым эффектом ВП.

	ρ , Ом	h , м
1 Слой	44	23.5
2 Слой	10	55.6
3 Слой	1700	∞
СКО=0.08		

Таблица 3.3

Глиняный карьер.

Результат инверсии данных зондирования с учётом ВП.

	ρ , Ом	h , м	η	τ	c
1 Слой	44	23.5			
2 Слой	10	55.6	0.1	0.025	0.49
3 Слой	1700	∞			
СКО=0.09					

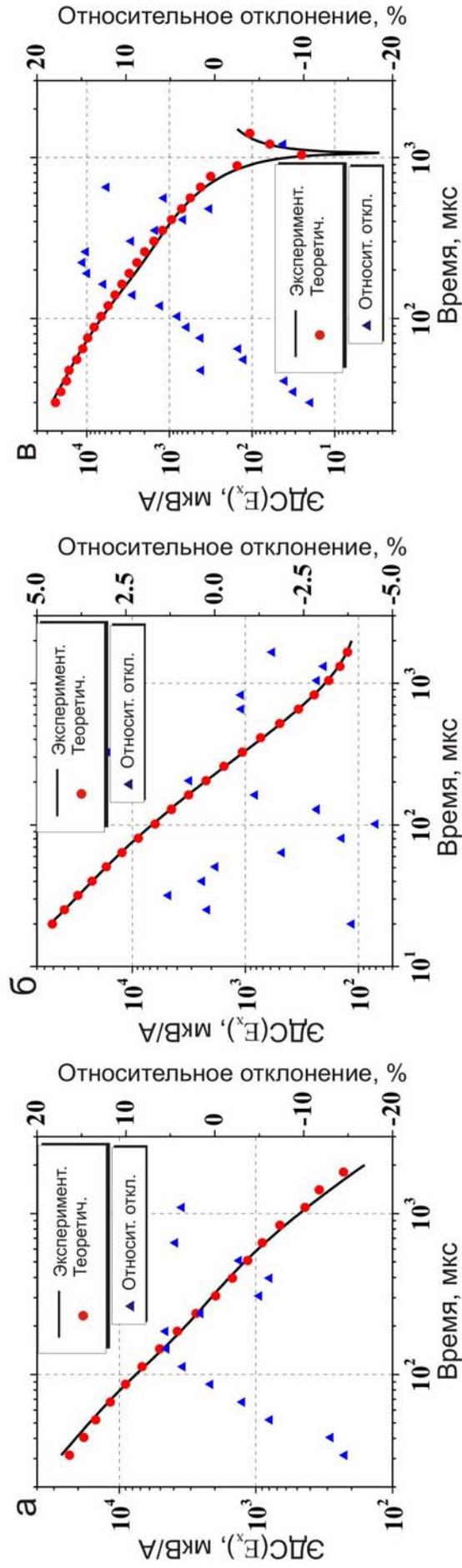


Рис. 3.16. Экспериментальные сигналы, полученные рядом с глиняным карьером параллельной гальванической установкой, подобранные теоретические кривые и их относительное отклонение для разных азимутальных углов:

а – $\phi = 31^\circ$, подбор параметров ρ , h ;

б – $\phi = 20^\circ$, подбор параметров η , τ , ϵ ;

в – $\phi = 45^\circ$, подбор параметров η , τ , ϵ .

Пос. Верх-Ирмень. Здесь для локализации точки со слабым проявлением ВП были выполнены зондирования параллельной гальванической установкой для углов: 45°, 20°, 30°, 25°, 27°, 29°, 28°, 28.5° и 28.25° при фиксированном разnose 75 м. При условии, что центр измерительной линии с азимутальным углом 28.25° расположен в точке с минимальным проявлением вызванной поляризации, по результатам инверсии данных зондирования (рис. 3,17а) построена модель неполяризуемой слоистой среды, представленная в таблице 3.4:

Таблица 3.4

пос. Верх-Ирмень.

Результат инверсии данных в точке зондирования со слабым эффектом ВП.

	$\rho, \text{ Омм}$	$h, \text{ м}$
1 Слой	73	22
2 Слой	125	19
3 Слой	66.5	21
4 Слой	5000	∞
СКО=0.03		

Затем построена единая модель слоистой поляризуемой среды, удовлетворительно соответствующая результатам зондирований с азимутальными углами 28° и 30° (табл. 3.5). Среднеквадратическое отклонение при инверсии каждой из кривых становления в этом случае не превышает 0.04. Соответствующие кривые экспериментальных и расчётных сигналов и их относительные отклонения приведены на рис. 3.17б и 3.17в.

Таблица 3.5

Пос. Верх-Ирмень.

Результат инверсии данных в точке зондирования с учётом ВП.

	$\rho, \text{ Омм}$	$h, \text{ м}$	η	τ	ϵ
1 Слой	73	22	0.05	0.1	0.37
2 Слой	125	19			
3 Слой	66.5	21	0.11	0.44	0.6
4 Слой	5000	∞			
СКО=0.04					

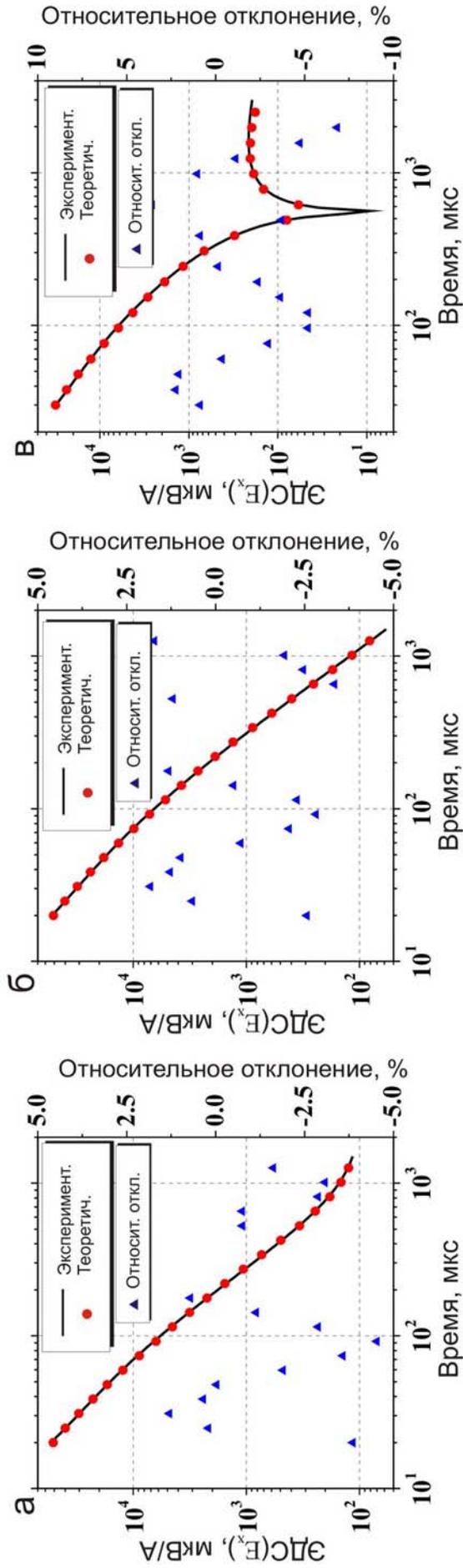


Рис. 3.17. Экспериментальные сигналы, полученные рядом с глиняным карьером параллельной гальванической установкой, подобранные теоретические кривые для разных азимутальных углов:

а – $\varphi = 28.25^\circ$, подбор параметров ρ , h ;

б – $\varphi = 28^\circ$, подбор параметров η , τ , c ;

в – $\varphi = 30^\circ$, подбор параметров η , τ , c .

Таким образом, полевым экспериментом подтверждена эффективность одного из разработанных способов (изменяется азимутальный угол с фиксированным разносом) поиска положения приемной линии для регистрации сигнала, наименее искаженного эффектом ВП. Для каждого случая (глиняный карьер и прибрежная зона вблизи пос. Верх-Ирмень) определены оптимальные конфигурации измерительной системы, отклики в которых пригодны для интерпретации в рамках неполяризующейся проводящей модели. Измерения проводились, в разных геологических условиях, что также подтверждает состоятельность способа.

Выводы

Путем численного моделирования переходного процесса, построения карт изолиний электромагнитного поля на дневной поверхности и их сравнительного анализа детально изучена чувствительность каждой из компонент электромагнитного поля к поляризации при различных положениях азимутального угла φ .

Установлено, что для компоненты E_y и вектора производных магнитной индукции $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$ какой-либо связи между изменением азимутального угла и влиянием вызванной поляризации на моделируемый сигнал не существует. Однако при измерениях параллельной гальванической установкой (источник и приемник – параллельные электрические линии) выявлена важная особенность: на карте изолиний для поздних времен становления поля всегда присутствуют две области – знакопеременных и знакопостоянных сигналов. Нестационарный сигнал, измеренный в точках на границе раздела этих областей, подвержен минимальному влиянию ВП. Значит появляется возможность восстановления параметров проводящего разреза за счёт использования пространственного разделения поляризационной и индукционной составляющих сигнала.

На примере поляризуемого полупространства теоретически доказано существование точек пространства с ослабленным влиянием ВП. Установлено, что изменение углов гальванической системы измерения является эффективным инструментом для выделения электродинамической составляющей сигнала.

Разработаны три способа поиска оптимальной гальванической зондирующей системы, для каждого из которых поставлены и решены оптимизационные задачи и выделены более предпочтительные для практического применения.

Результатами полевых экспериментов подтверждены результаты численного моделирования и состоятельность предложенного разделения поляризационной и электродинамической составляющей сигнала.

Стоит отметить, что при поиске оптимальной гальванической системы зондирования для изучения поляризующихся сред необходимо соблюдать повышенные требования к точности пространственного расположения источника и приемника. Исследование показало, что окрестность границы монотонных и знакопеременных сигналов является областью лучшей, по сравнению с традиционными (осевое и экваториальное положение приёмной линии), для отыскания параметров неполяризующейся среды.

Из вышеизложенного вытекает **второй защищаемый научный результат:**

Численно установлена зависимость компонент электромагнитного поля от геометрических параметров гальванической системы измерения и выполнено разделение электродинамической и поляризационной части сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные численные исследования электромагнитного поля с целью разделения процессов становления поля и вызванной поляризации повышают качество интерпретации данных и геологическую информативность метода зондирования становлением поля, а результаты имеют ряд преимуществ.

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение <Line_TEMIP_II>, по сравнению с известными, позволяет проводить **совместную инверсию** (две электрические и три компоненты вектора производных магнитной индукции) данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом вызванной поляризации, благодаря которой достоверность определяемых параметров геоэлектрического разреза существенно повышается.

Разработанная схема (алгоритм) совместной инверсии, в отличие от известных, учитывает **разную чувствительность** гальванических и магнитных компонент электромагнитного поля к вызванной поляризации, которая была доказана численно. Использование такой схемы повышает надежность и обоснованность заключений о строении геоэлектрического пространства.

Численно и экспериментально установлено, что вблизи границ раздела областей знакопеременных и монотонных сигналов **влияние ВП на отклик ослаблено**. На основе этого факта доказано существование оптимальной конфигурации установки, позволяющей минимизировать поляризационную составляющую сигнала, и предложены три способа поиска границ, поставлены и решены оптимизационные задачи для минимизации поляризационной составляющей измеряемого сигнала.

Результатами численного моделирования и натурных экспериментов доказано, что выбор оптимальной конфигурации системы наблюдения ведет

к упрощению решения обратной задачи и является эффективным способом повышения качества интерпретации данных зондирования становлением поля с гальваническим источником. Такой подход дает возможность не только повысить качество инверсии данных ЗС, но и увеличить общую информативность импульсной электроразведки.

Несомненно, работы, направленные на повышение качества интерпретации нестационарных зондирований поляризующихся сред нужно продолжать. Необходимо развитие трехмерного моделирования в поляризующихся средах, с учетом накопленного опыта использования одномерных моделей. Еще одним перспективным направлением является автоматизация инверсии электромагнитных измерений в целом и непосредственно данных зондирования становлением поля.

Установленное свойство электрической составляющей электромагнитного поля, возбуждаемого заземленной линией (ослабление влияния ВП на отклик вблизи границ раздела областей знакопеременных и монотонных сигналов), переводит малоиспользуемые в настоящее время гальванические установки в разряд наиболее перспективных для работы в условиях поляризующихся сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.В. Влияние поляризуемости горных пород на результаты электромагнитных зондирований [Текст] / В.В. Агеев, Б.С. Светов // Физика земли. – 1999. – № 1. – С. 19-27.
2. Антонов Е.Ю. Разделение эффекта становления и явления вызванной поляризации при зондировании поляризующихся сред методом переходных процессов [Текст] / Е.Ю Антонов, А.Н. Шеин // Сборник материалов международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА. – 2007. – С. 231-236.
3. Антонов Е.Ю. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований [Текст] / Е.Ю. Антонов, А.Н. Шеин // Геология и геофизика. – 2008. – № 10. – С. 1046-1062.
4. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований [Текст] / Л.Л. Ваньян – М.: Недра, 1965. – 109 с.
5. Васютинская Т.Ф. Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000, серия Кузбасская, лист N-44-XII. Объяснительная записка. [Текст] / Т.Ф. Васютинская, Д.В. Михайловский – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 104 с.
6. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе [Текст] / А.В. Вешев – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
7. Геннадиник Б.И. О природе явления вызванной поляризации в ионопроводящих породах [Текст] / Б.И. Геннадиник // Изв. выс. учеб. завед., Геология и разведка. – 1967. – №12. – С.110 – 117.
8. Губатенко В.П. Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке [Текст] / В.П. Губатенко // Физика земли. – 1991. – №4. – С. 88 – 98.

9. Губатенко В.П. Электромагнитное поле электрического диполя в макроанизотропных средах [Текст] / В.П. Губатенко // Физика земли. – 1994. – №12. – С. 62 – 69.
10. Долгун А.А. Распространение электромагнитного поля индукционного источника в средах с временной дисперсией электропроводности и диэлектрической проницаемости [Текст] / А.А. Долгун, Э.П. Шурина, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 2009. – т. 50. – №11. – С. 1266 – 1275.
11. Ельцов И.Н. Восстановление параметров частотной дисперсии удельного сопротивления по данным индукционного зондирования [Текст] / И.Н. Ельцов, М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Геофизика. – 1999. – №2. – С. 65 – 67.
12. Жандалинов В.М. Переходные процессы в условиях кимберлитовых полей западной Якутии: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук: 25.00.10 / Жандалинов Вячеслав Мерканович. – Новосибирск, 2005.
13. Жданов М.С. Электроразведка [Текст] / М.С. Жданов – М.: Недра, 1986. – 316 с.
14. Задорожная В.Ю. Учет процессов ВП в многослойных разрезах при индукционном зондировании [Текст] / В.Ю. Задорожная, В.П. Лепешкин // Физика земли. – 1998. – № 4. – С. 55-61.
15. Каменецкий Ф.М. Индукционные электромагнитные процессы в проводящей поляризующейся среде: Электромагнитная индукция в верхней части земной коры [Текст] / Ф.М. Каменецкий, В.А. Сидоров, В.М. Тимофеев, А.М. Яхин – М.:Наука, 1990. – С. 14-40
16. Каменецкий Ф.М. Некоторые особенности диспергирующей среды, не учитываемые при математическом моделировании ЭМ поля [Текст] / Ф.М. Каменецкий // Геофизика. – 1996. – №4. – С. 42 – 52.
17. Каменецкий Ф.М. О возможности разделения поляризационных и индукционных эффектов [Текст] / Ф.М. Каменецкий, В.М. Тимофеев // Физика земли. – 1984. – № 12. – С. 89-94.

18. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов [Текст] / Ф.М. Каменецкий – М.: ГЕОС, 1997. – 162 с.
19. Каринский С.Д. Об определении параметров Cole-Cole при каротаже скважин в поляризующихся средах [Текст] / С.Д. Каринский, Б.С. Светов // Физика земли. – 2007. - №4 – С. 53 – 57.
20. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть I. Гравитационные, электрические и магнитные поля. Пер. с англ.; Ред. пер. М.Н. Бердичевский [Текст] / А.А. Кауфман – М.: Недра, 1997. – 520 с.
21. Кожевников Н.О. Влияние релаксации намагниченности однородного полупространства на индукционные переходные характеристики [Текст] / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геология и геофизика. – 2008. – т. 49. – №3. – С. 262 – 276.
22. Кожевников Н.О. Инверсия данных МПП быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства [Текст] / Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов // Геофизика. – 2007. – №1 – С. 42 – 49.
23. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации [Текст] / В.А. Комаров – Л.: Наука, 1972. – 342 с.
24. Кондратьев В.А. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы [Текст] / В.А. Кондратьев, А.В. Поспеев, Ю.А. Агафонов, А.М. Пашевин, Е.А. Ольховик // Разведка и охрана недр. – 2004. – №8-9. – С. 26-28.
25. Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации [Текст] / В.В. Кормильцев – М.: Наука, 1980. – 256 с.
26. Куликов А.В. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации [Текст] / А.В. Куликов, Е.А. Шемякин – М.: Недра, 1978. – 175 с.

27. 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.
28. Легейдо П.Ю. Применение дифференциально-нормированной электроразведки на Непском своде [Текст] / П.Ю. Легейдо, М.М. Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика. – 1990. – №4. – С. 86-91.
29. Легейдо П.Ю. Разделение действия эффектов электромагнитной индукции и вызванной поляризации при дифференциально-нормированных измерениях в электроразведке [Текст] / П.Ю. Легейдо, В.П. Бубнов // Физика земли. – 1997. – №6. – С. 85 – 88.
30. Мандельбаум М.М. Современное состояние и перспективы применения дифференциально-нормированного метода электроразведки для поисков нефти и газа [Текст] / М.М. Мандельбаум, Е.В. Агеенков, П.Ю. Легейдо, И.Ю. Пестерев, Н.И. Рыхлинский // Геология и геофизика. – 2002. – т. 43 – №12. – С. 1137-1143.
31. Манштейн Ю.А. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач [Текст] / Ю.А. Манштейн, Е.В. Балков, А.К. Манштейн // Геофизика. – 2006. – № 1. – С. 43 – 50.
32. Мисюк В.А. Геологическая карта СССР м-ба 1:200 000, серия Кузбасская, лист N-44-XVII. Объяснительная записка. [Текст] / В.А. Мисюк, А.И. Казеннов – М.: Недра, 1979. – 99 с.
33. Могилатов В.С. Поля электрического и магнитного типов в электроразведке с контролируруемыми источниками: дис. на соискание уч. степ. д.т.н.: 04.00.12 / Могилатов Владимир Сергеевич. – Новосибирск, 2000. – 400 с.
34. Молчанов А.А. Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях [Текст] / А.А. Молчанов,

- В.А. Сидоров, Ю.В. Николаев, А.М. Яхин // Физика земли. – 1984. – № 1. – С. 100-103.
35. Павлов Е.В. Становление электромагнитного поля над наклонными геоэлектрическими границами и поляризующимися средами: Дис. на соискание уч. степ. к.т.н.: 25.00.10 / Павлов Евгений Владимирович. – Новосибирск, 2005. – 115 с.
36. Постельников А.Ф. О природе и механизме образования вызванной поляризации на образцах электропроводящих горных пород [Текст] / А.Ф. Постельников // Труды Центрального научно-исследовательского горноразведывательного института. М.: Недра, 1964. – вып. 59. – С. 153-164.
37. Рыхлинский Н.И. Применение дивергентного каротажа в нефтеразведочных скважинах Восточной Сибири [Текст] / Н.И. Рыхлинский, М.М. Мандельбаум, В.А. Ващенко, Н.В. Алаев // Состояние и задачи разведочной геофизики: Материалы VI Всесоюзной научно-технической геофизической конференции в г. Ленинграде. – М: Недра, 1970. – С. 223-226.
38. Светов Б.С. О разделении переменного электрического поля на потенциальную и индуцированную составляющую [Текст] / Б.С. Светов // Физика земли. – 2008. – № 6. – С. 74-76.
39. Светов Б.С. О частотной дисперсии электрических свойств среды [Текст] / Б.С. Светов // Физика земли. – 1992. – № 4. – С. 62-70.
40. Светов Б.С. Поляризуемости горных пород и феномен высокоразрешающей электроразведки [Текст] / Б.С. Светов, В.В. Агеев, Н.А. Лебедева // Геофизика. – 1996. – №4. – С. 53 – 55.
41. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка [Текст] / В.А. Сидоров – М.: Недра. – 1985. – 192 с.
42. Сидоров В.А. О вызванной поляризации горных пород при индуктивном возбуждении [Текст] / В.А. Сидоров, В.А. Яхин. // Физика Земли. – 1979. – №11 – С. 21-28.

43. Табаровский Л.А. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения (теория, алгоритмы, программы) [Текст] / Л.А. Табаровский, М.И. Эпов, О.Г. Сосунов // Новосибирск: Препринт ИГиГ СО АН СССР. – 1985 – №7. – 48 с.
44. Табаровский Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики [Текст] / Л.А. Табаровский – Новосибирск: Наука, 1975. – 144 с.
45. Табаровский Л.А. Программа расчета нестационарного поля дипольных источников в горизонтально-слоистой среде (Алекс) [Текст] / Л.А. Табаровский, В.П. Соколов // Электромагнитные методы геофизических исследований: Сб. науч. трудов. – Новосибирск, 1982. – С. 57-77.
46. Табаровский Л.А. Система автоматизированной интерпретации результатов электромагнитных зондирований [Текст] / Л.А. Табаровский, М.И. Эпов, Ю.А. Дашевский, И.Н. Ельцов // Тез. Всесоюз. конф. "Электромагнитная индукция в верхней части земной коры", Львов, М.: "Наука", 1990 - 2 с.
47. 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.
48. Шеин А.Н. Повышение эффективности инверсии многокомпонентных нестационарных зондирований в условиях поляризующихся сред [Текст] / А.Н. Шеин, Е.Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска и разведки полезных ископаемых: Сб. материалов. V Междунар. научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20-24 апреля 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА. – 2009. – С. 126-131.

49. Шеин А.Н. Совместная инверсия магнитных компонент нестационарных электромагнитных зондирований в условиях ВП [Текст] // Десятая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. Пермь: Горный институт УрО РАН. – 2009. – С. 245-250.
50. Шеин А.Н. Выбор оптимальной системы наблюдения при многокомпонентных нестационарных зондированиях поляризующихся сред [Текст] / А.Н. Шеин // Материалы научной конференции «Трофимуковские чтения» для студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, 3-4 октября 2006 г, Новосибирск. – Новосибирск: ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН. – 2007 г. – С. 162-164.
51. Шейнман С.М. Современные физические основы теории электроразведки [Текст] / С.М. Шейнманн – Л.: Недра, 1969. – 224 с.
52. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах. / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989.
53. Эпов М.И. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований [Текст] / М.И. Эпов, Ю.А. Дашевский, И.Н. Ельцов // Новосибирск: Препринт ИГиГ СО АН СССР. – 1990. – № 7. – 29 с.
54. 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. – № 6. – С. 920-929.
55. Эпов М.И. Нестационарное электромагнитное поле над средой с малоамплитудной пологой структурой [Текст] / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов, И.Н. Ельцов // Геология и геофизика. – 1990. – № 11. – С. 137 – 143.
56. Эпов М.И. Прямые задачи электромагнитных зондирований с учетом дисперсии геоэлектрических параметров [Текст] / М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов // Физика земли. – 1999. – №4. – С. 48 – 55.

57. Эпов М.И. Способ учета характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах [Текст] / М.И. Эпов, Н.Н. Неведрова, Е.Ю. Антонов // Геофизический вестник. – 2006. – №6. – С. 8-14.
58. Buselli G. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods [Text] / G. Buselli, Lu Kanglin // Journal of Applied Geophysics. – 2001. – Vol.48 – Issue 1. – P.11 – 23.
59. Caglar I. A Method to Remove Electromagnetic Coupling from Induced Polarization Data for an "Exponential" Earth Model [Text] / Ilyas Caglar // Pure and Applied Geophysics. – 2000. – Vol.157. – №10. –P. 1729 – 1748.
60. Commer Michael Three-dimensional inversion of time-domain EM data with highly constrained model complexities [Text] / Michael Commer, Andreas Hördt, Stefan L. Helwig, Carsten Scholl // Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung. – Königstein. – 2003. – Hrsg.: A. Hördt und J. B. Stoll
61. Das U.C. Apparent resistivity curves in controlled-source electromagnetic sounding directly reflecting true resistivities in a layered earth [Text] / Umesh C. Das // Geophysics. – 1995– Vol.60. – №1. – P. 53 – 60.
62. Descloitres M. Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization. A case study in resistive rocks of the Fogo volcano, Cape Verde Islands [Text] / M. Descloitres, R. Guerin, Y. Albouy, A. Tabbagh, M. Ritz // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol.45 – Issue 1. – P. 1 – 18.
63. Dias C.A. Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks [Text] / C.A. Dias // Geophysics. – 2000. – Vol.65. – №2. – P. 437 – 451.
64. El-Kaliouby H.M. Optimum negative response of a coincident-loop electromagnetic system above a polarizable half-space [Text] / H.M. El-Kaliouby, E.A. El-Diwany, S.A. Hussain^α, E.A. Hashish, A.R. Bayoumi // Geophysics. – 1997. – Vol.62. – №1. – P. 75 – 79.

65. El-Kaliouby H.M. Transient electromagnetic responses of 3D polarizable body [Text] / H.M. El-Kaliouby, E.A. Eldiwany // *Geophysics*. – 2004 – Vol.69. – №2. – P. 426 – 430.
66. Flis M.F. Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements [Text] / M.F. Flis, G.A. Newmani and G.W. Hohmann // *Geophysics*. – 1989 – Vol.54. – №4. – P. 514 – 523.
67. Gill Ph.E. Practical Optimization [Text] / Ph.E.Gill, M. Walter, W. Margaret – New York: Academic Press, 1981.
68. Harinarayana T. Combination of EM and DC measurements for upper crustal studies [Text] / T. Harinarayana // *Surveys in Geophysics*. – 1999. – Vol.20. – №3-4. –P. 257- 278.
69. Hoheisel A. The influence of induced polarization on long-offset transient EM data [Text] / A. Hoheisel, A. Hordt, T. Hanstein // *Geophysical Prospecting*. – 2004. – vol.52. – Issue 5. – P. 417 – 426.
70. Hordt A. Interpretation of long-offset transient electromagnetic data from the Odenwald area, Germany, using two-dimensional modelling [Text] / A. Hordt, S. Dautel, B. Tezkan and H. Thern // *Geophysical Journal International*. – 2000. – Vol.140. – Issue 3. – P. 577 – 586.
71. Kozhevnikov N.O. Fast-decaying IP in frozen unconsolidated rocks and potentialities for its use in permafrost-related TEM studies [Text] / N.O. Kozhevnikov, E.Y. Antonov // *Geophysical Prospecting*. – 2006. – vol.54. – P. 383 - 397.
72. Lee T. Transient electromagnetic response of a polarizable ground [Text] / T. Lee // *Geophysics*. – 1981 – Vol.46. – №7. – P. 1037 – 1041.
73. Lima Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements [Text] / O.A.L. de Lima, Sri Niwas // *Journal of Hydrology*. – 2000. – Vol.235. – Issue 1-2. – P.12-26.
74. Marshall D.J. Induced polarisation: A study of its causes [Text] / D.J. Marshall, T.R. Madden // *Geophysics*. – 1959. – Vol.24. – №4. – P. 790 – 816.

75. Meju M.A. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations [Text] / M.A. Meju // *Geophysics*. – 1996. – Vol.61. – №1. – P. 56 – 65.
76. Meju M.A. Simple relative space–time scaling of electrical and electromagnetic depth sounding arrays: implications for electrical static shift removal and joint DC-TEM data inversion with the most-squares criterion [Text] / M.A. Meju // *Geophysical Prospecting*. – 2005. – vol.53. . – Issue 4. – P. 463 – 479.
77. Nabighian M.N. Quasi-static transient response of a conducting half-space: An approximate representation [Text] / M.N. Nabighian // *Geophysics*. – 1979 – Vol.44. – №10. – P. 1700 – 1705.
78. Nelder J.A. A simplex method for function minimization [Text] / J.A. Nelder, R. Mead // *Computer Journal*. – 1965. – №7. – P. 308-313.
79. Newman G.A. Interpretation of transient electromagnetic sounding over three-dimensional structures for the central loop configuration [Text] / G.A. Newman, W.L. Anderson and G.W. Hohmann // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* – 1987. – Vol.89. – P. 889–914.
80. Newman G.A. Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth [Text] / G.A. Newman, W.L. Anderson and G.W. Hohmann // *Geophysics*. – 1986 – Vol.51. – №8. – P. 1608 – 1627.
81. Pelton W.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP [Text] / W.H. Pelton, S.H. Wards, P.G. Hallof, W.R. Sills and P.H. Nelson // *Geophysics*. – 1978. – Vol.43. – №3. – P. 588 – 609.
82. Raiche A.P. The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schlumberger sounding to resolve layered structures [Text] / A. P. Raiche, D. L. B. Jupps, H. Rutterg, and K. Vozoff // *Geophysics*. – 1985. – Vol.50. – №10. – P. 1618 – 1627.
83. Routh P.S. Electromagnetic coupling in frequency-domain induced polarization data: a method for removal. [Text] / P.S. Routh,

- D.W. Oldenburg // *Geophysical Journal International*. – 2001. – Vol.145. – Issue 1. – P. 59 – 76.
84. Scholl C. The influence of multidimensional structures on the interpretation of LOTEM data with one-dimensional models and the application to data from Israel: Inaugural – Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen / Carsten Scholl. – University of Cologne, Germany, 2005. – pp. 802.
85. Seigel H.O. Mathematical formulation and type curves for induced polarization [Text] / H.O. Seigel // *Geophysics*. – 1959 – Vol.24. – №3. – P. 547 – 565.
86. Shein A.N. Optimization of galvanic TEM-system geometry to decrease induced polarization effect on transient electromagnetic data [Text] / Shein A.N. E.Yu. Antonov // *Abstracts of The 19th International Workshop on EM Induction in The Earth, Beijing CHINA, October 23-29. – 2008. – P. 19-23.*
87. Strack K.-M. Exploration with deep transient electromagnetics [Text] / K.-M. Strack – Elsevier, 1992. – 373 pp.
88. Strack K.-M. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) depth soundings applied to crustal studies in the Black Forest and Swabian Alb, Federal Republic of Germany [Text] / K.-M. Strack, E. Luschen and A.W. Kotz // *Geophysics*. – 1990. – Vol.55. – №7. – P. 834 – 842.
89. Tezkan B. A joint application of radiomagnetotellurics and transient electromagnetics to the investigation of a waste deposit in Cologne (Germany) [Text] / B. Tezkan, M Goldman, S. Greinwald, A. Hordt, I. Muller, F.M. Neubauer, G. Zacher // *Journal of Applied Geophysics*. – 1996. – vol.34 – Issue 3. – P. 199 – 212.
90. Tezkan B. A Review of environmental applications of quasi-stationary electromagnetic techniques [Text] / B. Tezkan. // *Surveys in Geophysics*. – 1999. – Vol.20. – №3-4. –P. 279 – 308.

91. Vozoff, K. Joint inversion of geophysical data [Text] / K. Vozoff, D.L.B. Jupp // *Geophys J. Roy. Astr. Soc.* – 1975. – №42. – P. 977–991.
92. Weidelt P. Response characteristics of coincident loop transient EM system [Text] / P. Weidelt // *Geophysics.* – 1982. – Vol.47. – №9. – P. 1325 – 1330.
93. Wait J.R. Relaxation phenomena and induced polarization [Text] / J.R. Wait // *Geoexploration.* – 1984. – №22. – P. 107 – 122.
94. Xiang J. A new method to discriminate between a valid IP response and EM coupling effects [Text] / J. Xiang, N.B. Jones, D. Cheng, F.S. Schlindwein // *Geophysical Prospecting.* – 2002. – vol.50. – Issue 6. – P. 565 – 576.
95. Zadorozhnaya V. New model of polarization of rocks: theory and analysis [Text] / V. Zadorozhnaya // *Abstracts of The 19th International Workshop on EM Induction in The Earth, Beijing CHINA, October 23-29.* – 2008. – P. 308-313.
96. Zhang Zhiyi Reconstruction of 1-D conductivity from dual-loop EM data [Text] / Zhiyi Zhang, P.S. Routh, D.W. Oldenburg, D.L. Alumbaugh, G.A. Newman // *Geophysics.* – 2000. – Vol.65. – №2. – P. 492 – 501.