

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**НОВОСИБИРСК**  
2010

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

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент Антонов Евгений Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Шурина Элла Петровна

доктор физико-математических наук,  
Дашевский Юлий Александрович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт геофизики  
Уральского отделения РАН  
(ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург)

Защита состоится 25 июня.2010 г. в 11 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской  
академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН по адресу:  
пр-т Ак. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, конференц-зал.  
Тел.: (383) 330 62 84  
Факс: (383) 333 25 13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН

Автореферат разослан 21 мая 2010 г.

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

Н.Н. Неведрова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Объект исследования** – электромагнитное поле, возбуждаемое линейным гальваническим источником в горизонтально-слоистых средах с низкочастотной дисперсией удельного электрического сопротивления.

**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 зондирования 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 ( $\rho, h$ ) до пяти ( $\rho, h, \eta, \tau, c$ ), 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). Основной метод 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\_II> 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 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  $\varphi$  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.

#### **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.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

Импульсная индуктивная электроразведка с начала XX века прочно заняла свое место как при геофизических исследованиях строения Земли, так и при поисках и разведке полезных ископаемых. Теоретические основы этого направления геофизики изложены в классических 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. Большой вклад в развитие метода внесли 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 разработали Ю.А. Дашевский, И.Н. Ельцов, В.С. Могилатов, Л.А. Табаровский, Г.М. Тригубович, М.И. Эпов, С.Н. Stoyer и др.

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. Однако по мере развития экспериментальной базы и совершенствования аппаратуры в 60-70-е годы XX века исследователи стали регистрировать данные, не поддающиеся интерпретации в рамках такой модели (В.А. Сидоров, А.Д. Скурихин, H.F. Morrison, R.K. Spies и др.). Одним из возможных объяснений возникновения аномальных переходных процессов может быть то, что в сигнале содержится составляющая, обусловленная вызванной поляризацией горных пород. Сегодня идея влияния ВП на регистрируемый сигнал ЗС является достаточно разработанной и принимается большинством специалистов (В.В. Агеев, Б.И. Геннадик, В.П. Губатенко, В.А. Комаров, В.В. Кормильцев, Б.С. Светов, С.М. Шейнманн, D.J. Madden, T.R. Marshall, T. Lee, W.H. Pelton и др.).

Тем не менее до настоящего времени все еще остается много вопросов о природе аномальных откликов при нестационарных электромагнитных зондированиях. Это обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования теории нестационарных зондирований как в области многомерного моделирования (П.С. Мартышко, А.Н. Ратушняк, Ю.Г. Соловейчик, Г.М. Тригубович, О.А. Хачай, Э.П. Шурина, К.-М. Strack, К. Spitzer, M.S. Zhdanov и др), так и учёта внутреннего сложного строения горизонтально-слоистых сред – анизотропии, магнитной вязкости и вызванной поляризации (Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников, В.Ю. Задорожная; M. Descloitres и др.). Однако такие подходы усложняют основную проблему, стоящую перед геофизиками, – решение обратной задачи, так как возрастает количество определяемых параметров.

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.

Другим способом является выбор оптимальной геометрии измерительной системы (В.М. Жандалинов, П.Ю. Легейдо, М.М. Мандельбаум, Н.И. Рыхлинский, I. Caglar, P.S. Routh, J. Xiang и др.). Эти исследования направлены либо на выделение составляющей переходной характеристики, обусловленной поляризуемыми объектами, либо, наоборот, на подавление влияния ВП. При условии существования адекватной петрофизической модели, пять параметров, определяющих решение прямой задачи  $(\rho, \eta, \tau, c, h)$ , дают больше возможностей для геологической интерпретации, чем два  $(\rho, h)$ .

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 ИЗМЕРЕНИЙ К ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ**

На основе программно-алгоритмического аппарата, разработанного в ИНГГ СО РАН (Л.А. Табаровский, В.П. Соколов, М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов, 1975, 1982, 1996) создана программа <Line\_TEMIP\_II>, которая позволяет имитировать становление каждой из измеряемых компонент (решать прямую задачу) и проводить как покомпонентную, так и совместную инверсию данных многокомпонентных нестационарных зондирований для поляризующихся горизонтально-слоистых геологических сред.

Для учёта процесса вызванной поляризации в решение электродинамической гармонической задачи вводится комплексная функция  $\rho(\omega)$ , которой описывается частотная дисперсия удельного сопротивления. 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, 1978):

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

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

С помощью названной программы <Line\_TEMIP\_II>, исследована чувствительность компонент нестационарного электромагнитного поля

к изменению параметров поляризации. При численном эксперименте использовались параметры характерные для системы многокомпонентных нестационарных зондирований LOTEM (Strack, 1992): разнос (3000 м), источник в виде заземленной линии (2000 м), приемники – две линии (200 м) и индукционные датчики (2500 м<sup>2</sup>), которые регистрируют компоненты электрического поля  $(E_x, E_y)$  и полный вектор производных магнитной индукции  $(\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z)$ .

Результатами сравнительного анализа и численного моделирования переходных характеристик для разных типов моделей  $(\rho_1 < \rho_2 < \rho_3, \rho_1 < \rho_2 > \rho_3, \rho_1 > \rho_2 < \rho_3, \rho_1 > \rho_2 > \rho_3)$  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). Этот факт непременно должен учитываться в совместной инверсии данных многокомпонентных нестационарных зондирований, что должно привести к улучшению качества интерпретации измерений, осложнённых присутствием ВП.

Решение обратной задачи (совместная инверсия) находится методом нелинейной минимизации (модифицированным методом Нелдера-Мида) функционала среднего значения среднеквадратичных отклонений экспериментальных и модельных данных:

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

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,  $f_j^{\ominus}(\mathbf{P}, t)$  - расчётный модельный сигнал,  $\delta$  - 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.

Прежде чем использовать совместную инверсию была показана ее эффективность на синтетических данных. Для этого была проведена инверсия для набора стартовых моделей (отклонения от истинных значений геоэлектрических параметров до 25%) 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  $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ . Ошибки результатов подбора продольной проводимости  $S_i = \sigma_i h_i$  для каждого из случаев инверсии представлены в графическом виде на рис. 1.

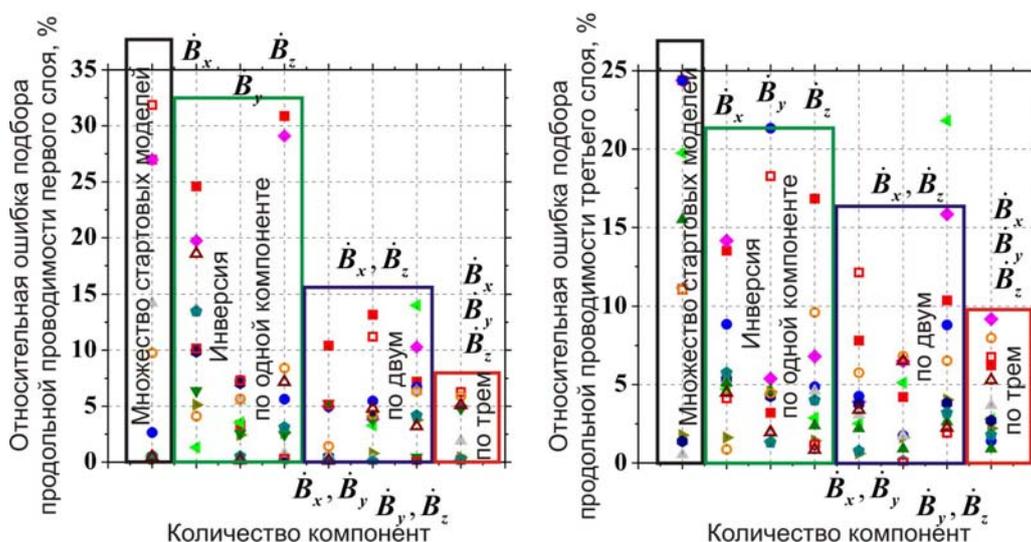


Рис. 1. Изменение качества подбора продольной проводимости при увеличении количества используемых компонент в совместной инверсии. Слева – ошибка подбора продольной проводимости относительно истинной для первого слоя, справа – для третьего.

Из рисунка видно, что качество подбора параметров модели повышается с увеличением количества используемых компонент производных магнитной индукции в совместной инверсии.

Исходя из вышеизложенного, разработан поэтапный алгоритм совместной инверсии:

- слабая чувствительность вектора производных магнитной индукции к поляризуемым средам позволяет восстанавливать сопротивления  $\rho_i$  и мощности  $h_i$  исследуемого разреза;

- высокая чувствительность электрических компонент к поляризации используется для подбора параметров Cole-Cole, где в качестве стартового приближения используется неполяризуемая модель, восстановленная в результате совместной инверсии компонент полного вектора производных магнитной индукции.

На синтетических и экспериментальных данных показано, что предложенный поэтапный алгоритм инверсии и его программная реализация <Line\_TEMIP\_II> является эффективным инструментом повышения достоверности геоэлектрических разрезов при нестационарных зондированиях поляризуемых сред.

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

На основе программно-алгоритмического аппарата, разработанного в ИНГГ СО РАН (Л.А. Табаровский, В.П. Соколов, М.И. Эпов, Е.Ю. Антонов) создана программа <Line\_TEMIP\_Isolines>, которая позволяет рассчитывать изолинии в фиксированный момент на дневной поверхности и переходные характеристики заданной компоненты электромагнитного поля.

При численном исследовании чувствительности переходных характеристик к эффекту вызванной поляризации в зависимости от взаимного положения генераторной и приемной линий использовались размеры установки, характерные LOTEM (Strack, 1992): 2000 м – длина питающей линии АВ, 2500 м<sup>2</sup> – эффективная площадь приемной петли (Q), 200 м – длина приемной линии MN, центр диполя АВ совпадает с центром координат, а момент направлен по оси ОХ.

Численное моделирование переходных характеристик при гальваническом возбуждении поляризуемого полупространства позволило установить следующие факты, которые были подтверждены для ряда горизонтально-слоистых моделей:

- сигнал электрической компоненты  $E_x$  при гальваническом возбуждении среды имеет качественные отличия для разных азимутальных углов: существуют положения приемника (рис. 2б, синяя область), где сигнал имеет знакопеременное затухание (рис. 2а, синяя кривая), угловые сектора, где сигнал имеет монотонную форму (рис. 2, красная область) и сектора с ослабленной чувствительностью к ВП (рис. 2, положение приемника вблизи границы  $\Gamma$  и зеленая кривая);
- сигналы компонент  $E_y$  и  $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$  не имеют качественных изменений переходных характеристик для разных азимутальных углов: 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  $\dot{B}_y, \dot{B}_z$ .

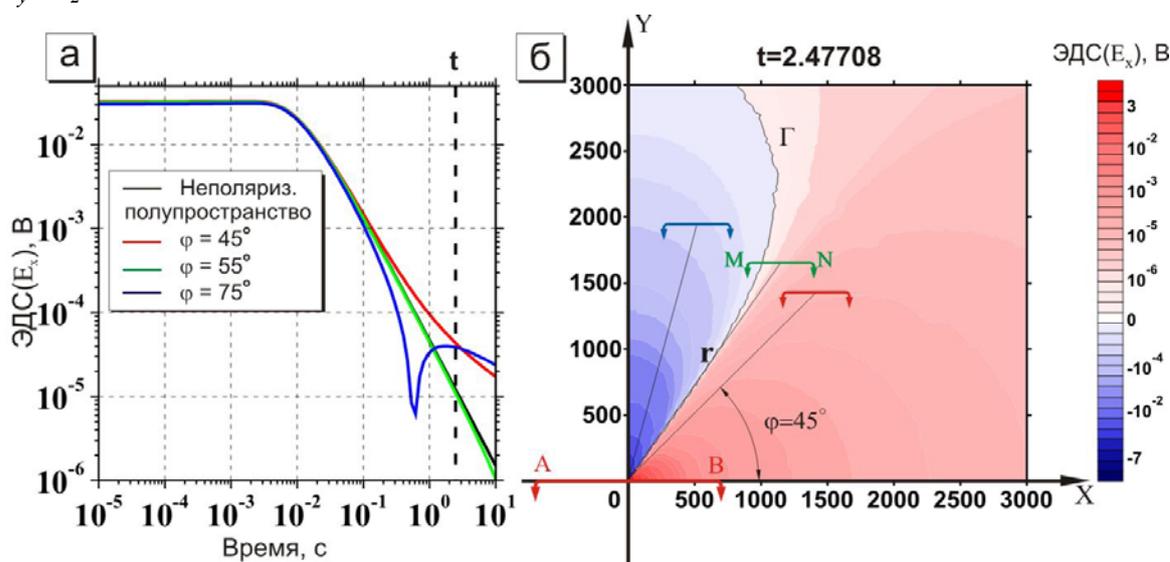


Рис. 2. Влияние азимутального угла  $\varphi$  на моделируемый сигнал  $E_x$ .

а – синтетические сигналы компоненты  $E_x$ ;

б – карта 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:  $AB = 2000 \text{ м}$ ,  $MN = 200 \text{ м}$ .

Значимым является тот факт, что при измерениях параллельной гальванической установкой существует граница раздела знакопеременных и монотонных сигналов  $\Gamma$ , которая проходит через точки пространства, где влияние вызванной поляризации ослаблено.

Несомненно, отмеченный факт должен использоваться при решении задачи разделения процессов поляризации и становления.

Аналитическое обоснование существования оптимальной зондирующей системы можно провести на примере поляризуемого полупространства. Низкочастотное разложение для мнимой части выражения  $E_{\parallel}(\omega)$  позволяет получить выражение  $(3 \cos^2 \varphi - 1) \cos \psi + 3 \sin \varphi \cos \varphi \sin \psi$ , которое определяет зависимость нестационарного сигнала от азимутального угла  $\varphi$  и угла между моментами  $\psi$  источника и приемника. Приравняв к нулю полученное выражение, можно определить оптимальную комбинацию углов, при которой влияние ВП минимально. В частности, для часто используемого на практике азимутального угла  $\varphi = 45^\circ$  получаем  $\psi = -18,4^\circ$ .

Проведенные численные и теоретические исследования дают основание для разработки способов конфигурирования измерительной установки, которые позволяют минимизировать поляризационную составляющую измеряемого сигнала.

**Способ 1.** Изменение азимутального угла при фиксированном разносе.

**Способ 2.** Перемещение приемной линии параллельно источнику

**Способ 3.** Изменение угла  $\psi$  при фиксированном положении приемника

Полевым экспериментом подтверждена эффективность способа 1 поиска положения приемной линии для регистрации сигнала, наименее искаженного эффектом ВП, и определены оптимальные конфигурации измерительной системы, отклики в которых пригодны для интерпретации в рамках неполяризуемой проводящей модели. Измерения проводились в разных геологических условиях, что подтверждает важный вывод, сделанный на основе численного моделирования: разделение электродинамической и поляризационной части нестационарного сигнала возможно путем выбора оптимальной измерительной системы.

## **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\_JI>, 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 натуральных 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.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Антонов Е.Ю. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований [Текст] / Е.Ю. Антонов, **А.Н. Шеин** // Геология и геофизика. – 2008. – т 49. – № 10. – С. 1046-1062.

2. **Шеин А.Н.** Инверсия данных многокомпонентной электроразведки [Текст] // Тезисы докладов. V Международная научно-практическая геолого-геофизическая конференция-конкурс молодых ученых и специалистов «Геофизика – 2005», 12-15 сентября 2005 г, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург. – 2005. – С. 314-317.

3. **Шеин А.Н.** Совместная инверсия данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом частотной дисперсии проводимости [Текст] // Современные проблемы геофизики. Седьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник материалов. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2006. – С. 176-180.

4. **Шеин А.Н.** Совместная инверсия данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом вызванной поляризации на примере Крестищенского месторождения [Текст] // Сборник материалов международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2006», 24-28 апреля 2006г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА. – 2006. – С. 179-184.

5. **Шеин А.Н.** Совместная инверсия данных многокомпонентных нестационарных зондирований с учетом вызванной поляризации и параметров установки [Текст] // Материалы всероссийской конференции аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Рациональное природопользование». – Ярославль: ЯрГУ. – 2006. – С. 199-204.

6. **Шеин А.Н.** Выбор оптимальной системы наблюдения при многокомпонентных нестационарных зондированиях поляризующихся сред [Текст] // 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. – 2006 г. – С. 162-164.

7. **Шеин А.Н.** Зависимость данных многокомпонентных нестационарных зондирований поляризующихся сред от положения приемника [Текст] // Тезисы докладов Третьей Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о земле. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН. – 2006. – С. 252-254.

8. **Шейн А.Н.** Повышение геологической информативности метода переходных процессов в условиях поляризующихся сред [Текст] / А.Н. Шейн, Е.Ю. Антонов // Восьмая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: Горный институт УрО РАН. – 2007. – С. 276-281.

9. Антонов Е.Ю. Разделение эффекта становления и явления вызванной поляризации при зондировании поляризующихся сред методом переходных процессов [Текст] / Е.Ю. Антонов, **А.Н. Шейн** // Сборник материалов международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА. – 2007. – С.231-218.

10. **Шейн А.Н.** Исследование зависимости отклика поляризованного полупространства от конфигурации зондирующей системы [Текст] // Современные проблемы геофизики. Девятая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник материалов. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2008. – С. 213-217.

11. **Шейн А.Н.** Оптимизация геометрии гальванической установки для уменьшения влияния вызванной поляризации на результаты нестационарных электромагнитных зондирований [Текст] // Сборник материалов IV международного научного конгресса «Гео-Сибирь-2007», 22-24 апреля 2008г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА. – 2008. – С.214-219.

12. **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.

13. **Шейн 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.

14. **Шейн А.Н.** Повышение эффективности инверсии многокомпонентных нестационарных зондирований в условиях поляризующихся сред [Текст] / А.Н. Шейн, 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.

---

Технический редактор Е.В. Бекренёва

---

Подписано к печати 30.04.2010  
Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс.  
Печ. л. 0,9. Тираж 140. Зак. №46

---

ИНГГ СО РАН, ОИГ, пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090