

*На правах рукописи*



**СЕМИНСКИЙ Игорь Константинович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ЗСБ  
НА ПРЕДПОЛЕВОМ И ИНТЕРПРЕТАЦИОННОМ ЭТАПАХ  
СРЕДСТВАМИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

**Научный руководитель:** **Кожевников Николай Олегович**,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории  
геоэлектрики ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

**Официальные оппоненты:** **Куликов Виктор Александрович**,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор  
кафедры геофизических методов исследования  
земной коры Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

**Турганов Евгений Хрисанфович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией комплексной геофизики  
Института земной коры СО РАН, г. Иркутск

**Ведущая организация:** Северо-Восточный комплексный  
научно-исследовательский институт ДВО РАН,  
г. Магадан

**Защита состоится** 14.12.2017 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.01 при Иркутском национальном исследовательском техническом университете по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ, ауд. Е-301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет и на сайте <http://www.istu.edu/devatelnost/nauka/dissertatsii/elementy/30495>.

Отзывы на диссертацию и автореферат просим представлять в диссертационный совет не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, наименование организации и должность в этой организации. Отзыв в 2 экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета Галине Дмитриевне Мальцевой по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНТУ, диссовет Д 212.073.01 (тел. 89149323049, e-mail: [dis@istu.edu](mailto:dis@istu.edu)).

**Автореферат разослан** 01.11. 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.073.01, кандидат геол.-минерал. наук

Мальцева Г.Д.

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** В последние годы задачи, стоящие перед нефтегазовой геофизикой, и, в частности, перед электроразведкой, усложнились. Это связано с современной направленностью сырьевой политики Российской Федерации на поиск и разведку месторождений второй и третьей групп сложности геологического строения. Как следствие, расширяется набор приемов и способов зондирований, что неизбежно приводит к увеличению производственно-финансовых затрат. В этих условиях становятся актуальны исследования, направленные на оптимизацию технологии электроразведочных работ и, в частности, метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), который широко используется при поисках и разведке месторождений углеводородного сырья.

Становление электроразведки как самостоятельного метода геофизики произошло благодаря фундаментальным исследованиям братьев Шлюмберже. В развитие теоретических основ ЗСБ внесли существенный вклад В.А. Сидоров, В.В. Тикшаев, А.А. Кауфман, Г.М. Морозов, Г.Г. Обухов, Е.И. Терехин, П.П. Фролов, Ю.В. Якубовский, Г.В. Келлер, Дж.Р. Уэйт и др. С 70-х годов XX века этот метод активно применяется на Сибирской платформе при решении структурных, нефтегазопроисловых, рудных и инженерных задач [Рабинович, Захаркин, 1976]. В процессе многолетних исследований изменились технология работ, аппаратура, подходы к интерпретации результатов, появилась малоглубинная модификация ЗСБ и т.д. В производственно-методическом отношении развитие метода осуществлялось в таких организациях как «Ниже-Волжский НИИ геологии и геофизики», «Иркутскгеофизика», «Якутскгеофизика», «СНИИГиМС», «Северо-Запад», «Алроса», «ИЭРП» и многих других.

К настоящему времени на юге Сибирской платформы выполнено более 100 тысяч физических наблюдений ЗСБ. Сложившаяся технология является компромиссом между производственной и геологической эффективностью зондирований. При этом не формализованы некоторые ключевые моменты методики ЗСБ на предполевом и интерпретационном этапах работ. Неясным остается вопрос обоснования выбора длины стороны генераторной петли (ГП) и расстояния между приемниками (ПК). Недостаточно исследовано осложнение кривых ЗСБ влиянием трехмерных неоднородностей, свойственных земной коре юга Сибирской платформы. Остается открытым вопрос оценки погрешностей восстановления параметров разреза, к которым приводит влияние трехмерных неоднородностей.

Традиционно на юге Сибирской платформы применяется технология зондирований, основанная на регистрации сигнала становления электромагнитного (ЭМ) поля, возбуждаемого генераторной петлей с помощью группы приемников поля. Как правило, длина стороны генераторной петли (источника поля) в глубинной модификации ЗСБ составляет от 500 до 1000 м, а расстояние между ПК – от 400 до 1000 м. Выбор стороны ГП и расстояния между ПК осуществляется исходя из геологических условий работ и производственных задач.

Неотъемлемым этапом интерпретации геофизических данных является инверсия. Под инверсией подразумевается подбор теоретической (рассчитанной путем решения

прямой задачи электроразведки, с помощью изменения толщины и сопротивления слоёв) к практической кривой. В настоящее время основным видом инверсии считается одномерный подход, основанный на расчетах в рамках горизонтально-слоистой модели (1D). Вторым, активно развивающимся, является трехмерный (3D) подход к инверсии данных, который применяется в тех случаях, когда изучаемую среду невозможно аппроксимировать горизонтально-слоистой моделью вследствие присутствия трехмерных неоднородностей [Тригубович, Персова, 2009]. В данной работе будут рассмотрены неоднородности геологической природы – разломные зоны, трапповые интрузии, дайки и т.д. В случае, когда такие неоднородности не являются объектом исследования, их присутствие считается осложняющим и искажающим сопротивление вмещающей среды и, в частности, целевого горизонта.

**Целью работы** является оптимизация технологии ЗСБ применительно к решению нефтегазопроисловых и структурных задач на территории юга Сибирской платформы. Оптимальная технология должна обеспечивать решение геологической задачи при приемлемых производственных затратах.

#### **Задачи исследования:**

1. Снижение погрешности восстановления параметров геологического разреза посредством изучения электромагнитного поля, создаваемого объектами, типичными для юга Сибирской платформы.

2. Обоснование оптимальной геометрии установки ЗСБ для типичных физико-геологических моделей юга Сибирской платформы.

3. Оценка эффективности комбинирования 1D и 3D подходов к интерпретации данных ЗСБ.

4. Разработка критериев необходимости применения трехмерной интерпретации данных ЗСБ для площадей Восточной Сибири.

Таким образом, **объектом исследования** являются электромагнитные поля, создаваемые геологическими 3D неоднородностями. **Территория исследования** – юг Сибирской платформы.

#### **Защищаемые положения:**

1. С помощью 3D моделирования обоснованы оптимальные геометрические параметры установки ЗСБ, эффективной для использования на Сибирской платформе в геологических условиях Непского свода. При решении структурных и нефтегазопроисловых задач оптимальными параметрами являются: размер стороны источника ЭМ поля – 600 м, шаг между приемниками ЭМ поля – 400-500 м.

2. При интерпретации данных ЗСБ, полученных на юге Сибирской платформы, критериями «неоднородности» являются: среднее квадратическое расхождение кривых  $r_1$  для одного источника ЭМ поля – более 10%, невязка подбора теоретических кривых к практическим для одной установки – более 10%. Анализ «трехмерности» 80 000 переходных характеристик ЗСБ, измеренных в условиях юга Сибирской платформы, показал, что влиянием 3D неоднородностей осложнены около 10% из них. Это играет ключевую роль при выборе подхода к инверсии данных.

3. При изучении юга Сибирской платформы методом ЗСБ базовой является 1D инверсия. В настоящее время она обеспечивает большую детальность изучения осадочного чехла по сравнению с 3D инверсией. В ряде случаев применение 3D

моделирования, в сравнении с 1D, позволяет добиться лучшей точности определения параметров перспективных геоэлектрических горизонтов, что повышает возможности ЗСБ за счет комплексирования подходов.

#### ***Новизна работы:***

1. Впервые применительно к типичным трехмерным неоднородностям строения земной коры юга Восточной Сибири для классификации аномалий ЭМ поля использовано трехмерное моделирование.

2. Изучен прирост геологической информации посредством трехмерной инверсии данных в условиях однородной и неоднородной сред применительно к территории Непского свода. Обоснованы численные критерии «неоднородности» кривых ЗСБ, играющие ключевую роль в выборе подхода к инверсии данных.

3. Разработана современная, основанная на численных параметрах методика, позволяющая настроить установку ЗСБ на решение конкретных геологических задач. В сравнении с известными подходами это дает возможность извлечь из результатов зондирований большую геологическую информацию при приемлемых экономических затратах.

***Фактический материал.*** В основу диссертации положены результаты полевых работ, полученные автором в составе АО «ИЭРП» с 2010 по 2017 г. на следующих площадях и лицензионных участках: Южно-Усть-Кутская, Чайндынская, Боханская, Аянская, Марковская, Игнялинская, Тымпучиканская, Вакунайская, Шестаковская, Ковыктинская, Зея-Буреинская, Санская, Большеширская и территория Приольхонья.

Одномерное математическое моделирование и работа с данными ЗСБ производилось в пограммном комплексе «SGS-TEM», в частности, с помощью программы количественной интерпретации «Model3» (Л.В. Суров, М.В. Шарлов, Ю.А. Агафонов). Трехмерное математическое моделирование производилось с помощью программы «GeoEM» (М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик), интегрированной в комплекс «SGS-TEM».

При решении поставленных задач автор опирался на работы Е.Ю. Антонова, А.А. Белой, М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна, Р.Г. Гусейнова, И.Н. Ельцова, А.К. Захаркина, Ф.М. Каменецкого, А.А. Кауфмана, Н.О. Кожевникова, И.А. Кремера, М.Г. Персовой, А.В. Поспеева, Б.И. Рабиновича, Ю.Г. Соловейчика, Б.С. Светова, В.А. Сидорова, В.В. Тикшаева, Г.М. Тригубовича, М.И. Эпова, Г.В. Келлера, Г.А. Ньюмана, К.Х. Стоера и других исследователей.

#### ***Личный вклад.***

1. Разработка методики выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ.

2. Адаптация программного комплекса «SGS-TEM» для трехмерного моделирования, зашумления сигналов и визуализации результатов.

3. Подготовка сводной физико-геологической модели (ФГМ) для Непского свода, уточнение параметров типичных трехмерных неоднородностей строения земной коры юга Восточной Сибири, визуализация результатов.

4. Расчеты трехмерных моделей, геологическая интерпретация результата.

5. Разработка и обоснование критериев «неоднородности» кривых ЗСБ.

6. Оценка размерности геоэлектрических моделей с привлечением архива ЭМ данных АО «ИЭРП» (80 000 ф.н. ЗСБ), зарегистрированных на юге Сибирской платформы.

**Теоретическая и практическая значимость результатов.** Предложенная в работе оптимизация установки ЗСБ обеспечивает возможность сокращения производственных затрат без значительного ущерба для качества данных. На примере эталонных моделей выявлено и учтено при интерпретации осложняющее влияние на сигнал трехмерной неоднородности, что позволило детально картировать методом ЗСБ пласт-коллектор в нижней части разреза. Прогноз подтвержден результатами бурения.

Геологическая эффективность проведенных исследований состоит в повышении точности восстановления геологической модели и достоверности прогноза. Научная значимость работы определяется возможностью применения использованного подхода к оптимизации методики ЗСБ для решения аналогичных задач в рамках близких по технологическим особенностям методов электроразведки.

Основные выводы исследования найдут практическое применение в производственных и научных организациях, касающихся производства ЗСБ. Использование разработанной методики позволяет при минимальных затратах повысить качество материалов ЗСБ и увеличить точность картирования пород геологического разреза исходя из характера решаемой задачи.

**Апробация работы.** Представленные в диссертации научные и практические результаты апробировались на семинарах, выставках и конференциях разного уровня: на научно-практической конференции «Геонауки-2013» (Иркутск, 2013); на Всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (Новосибирск, 2013); на 3-й Международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования и комплексной интерпретации геофизических данных «ГЕОБАЙКАЛ-2014» (Иркутск, 2014); на X Международной научно-практической конференции молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА-2015» (Санкт-Петербург, 2015); на 4-й Международной научно-практической конференции по электромагнитным методам исследования и комплексной интерпретации геофизических данных «ГЕОБАЙКАЛ-2016» (Иркутск, 2016); на научно-практической конференции «Игошинские чтения-2016» (Иркутск, 2016); на IV Всероссийском научно-практическом семинаре с международным участием им. Г.С. Вахромеева (Иркутск, 2017).

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору Н.О. Кожевникову и профессору А.В. Поспееву за постоянное внимание и консультационную помощь при подготовке диссертационной работы.

Особую благодарность за надежную поддержку и помощь в течение всего периода выполнения работы автор выражает генеральному директору АО «ИЭРП», к.т.н. Ю.А. Агафонову и зам. главного геофизика АО «ИЭРП», к.г.-м.н. И.В. Буддо.

Автор глубоко признателен профессору НГУ М.Г. Персовой за консультации и неоценимую помощь в подготовке расчетной базы для четвертой главы диссертационной работы.

За советы, консультации и замечания автор благодарит профессора А.Г. Дмитриева, д.ф.-м.н. Е.Ю. Антонова, к.г.-м.н. А.В. Мироманова, а также заместителя генерального директора АО «ИЭРП» М.В. Шарлова.

За методическую помощь в подготовке расчетов автор признателен коллегам по работе в АО «ИЭРП» Л.В. Сурову, А.И. Ильину, Е.М. Бугаковой, Е.В. Мурзиной и к.г.-м.н. Р.Г. Гусейнову.

Исключительно важно отметить большую роль в сборе полевого материала, положенного в основу диссертации, сотрудников полевых отрядов и партий, с которыми автор в течение многих месяцев работал в условиях Крайнего Севера.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 126 страниц текста, 60 рисунков и список литературы из 136 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Введение

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования и научная задача, изложены главные результаты, выносимые на защиту, дается характеристика их новизны и достоверности.

### Глава 1. Особенности метода ЗСБ

В настоящее время одним из основных методов электроразведки при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Метод основан на изучении электромагнитного поля, устанавливающегося в земной коре, при резком изменении тока в источнике. Выключение тока в генераторной петле вызывает появление индукционных токов, которые распространяются от дневной поверхности на глубину.

При работах методом ЗСБ на юге Сибирской платформы производственными организациями («Иркутскгеофизика», «СНИИГИМС», «Якутскгеофизика», «ИЭРП» и др.) с начала 90-х годов XX века используется технология работы многоразносными установками. Упомянутая технология, разработанная в СНИИГИМСе, основана на регистрации сигнала становления поля, возбуждаемого генераторной петлей с помощью нескольких приемников поля). Далее в диссертации под «разносом» подразумевается расстояние между центрами ГП и ПК.

В настоящее время вопрос выбора оптимального приемника ЭМ поля достаточно изучен, однако вопросы выбора оптимального источника ЭМ поля и расстояния между приемниками остаются дискуссионными [Захаркин, 2000].

В случае глубинных ЗСБ источниками ЭМ поля являются квадратные незаземленные генераторные петли с длиной стороны от 500 до 1000 м. Расстояние между приемниками составляет от 400 до 1000 м. Длина стороны ГП и расстояние между ПК выбираются исходя из геологической задачи и производственных условий. Обычно установка ЗСБ, в которой геометрические параметры варьируются в указанном диапазоне, позволяет решать геологическую задачу с приемлемой точностью. *Под приемлемой точностью решения геологической задачи* в данной работе понимается

восстановление параметров разреза ( $\rho$  и  $H$ ) с точностью, позволяющей выявить объект исследования на фоне вмещающей среды и помех (разделить: 3D объект/вмещающая среда, аномалия/шум).

Важным этапом интерпретации данных ЗСБ является решение обратной задачи электроразведки (инверсия). Традиционным видом инверсии на сегодняшний день является одномерный подход. Одномерной в ЗСБ считается среда, которую можно аппроксимировать горизонтально-слоистой моделью.

Такие геологические объекты, как разломные зоны, выклинивающиеся горизонты, трапповые интрузии и др., часто встречающиеся в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы, формируют ЭМ отклик, осложняющий сигнал от горизонтально-слоистой среды [Persova, 2005]. В связи с этим, в общем случае 1D инверсия для такой среды не является корректной, что и обуславливает необходимость 3D-моделирования.

*Под трехмерным объектом* в данной работе понимается неоднородность геологической природы, осложняющая ЭМ отклик от среды таким образом, что геологическая задача не решается в рамках 1D-инверсии.

Кратко рассмотрим распространение вторичного ЭМ поля в нижнем полупространстве в случае однородной и неоднородной сред. Вторичное ЭМ поле создается вихревыми токами, которые можно аппроксимировать кольцом [Набигян, 1979]. После выключения первичного ЭМ поля кольцо вихревых токов, увеличиваясь в диаметре, опускается вниз по разрезу. В проводящих слоях вихревые токи задерживаются дольше, чем в высокоомных. Скорость, с которой кольцо расширяется от источника, обратно пропорциональна удельной электропроводности [McNeill, 1980].

Если разрез сложен горизонтально залегающими слоями, в поздней стадии вихревые токи в нижнем полупространстве распространяются равномерно. Однако, когда вихревые токи достигают неоднородности или несогласно залегающих слоёв, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал ЭДС, регистрируемый на зажимах приемной петли, осложняется влиянием неоднородности.

В данной работе для моделирования электромагнитных откликов от эталонных моделей использовался программный комплекс «GeoEM», основанный на методе конечных элементов [Персова, 2009]. Первым этапом трехмерного моделирования является создание фоновой модели, которая служит фундаментом для расчетов, проводимых для решения конкретной задачи. Далее в эту модель помещается трехмерный (возмущающий) объект (или объекты), под которым понимается часть геологической среды, ответственная за аномальную составляющую суммарного ЭМ поля от всей физико-геологической модели. На следующем этапе ФГМ делится на ячейки (структурированную трехмерную сетку) и производится расчет ЭДС фоновой модели без объекта ( $\text{ЭДС}_{1D}$ ), с объектом ( $\text{ЭДС}_{3D}$ ) и от объекта ( $\text{ЭДС}_{An}$ ).

## **Глава 2. Методика выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ**

Важным методическим аспектом при планировании работ методом ЗСБ является выбор оптимальных геометрических параметров установки. В данном случае под геометрическими параметрами подразумевается длина стороны генераторной петли и расстояние (шаг) между приемниками ЭМ поля.

Очевидно, что с увеличением размеров установки ЗСБ время на её подготовку на местности увеличивается. Соответственно, на обслуживание работ требуется больше производственных ресурсов (время, персонал, техника и т.д.). Обслуживание установок меньшего размера в производственном плане выгоднее, однако, с их помощью невозможно решить ряд геологических задач ввиду небольшой глубины зондирования.

В соответствии с инструкцией по электроразведке, *оптимальными геометрическими параметрами* установки ЗСБ считаются параметры, позволяющие решить геологическую задачу при приемлемых финансовых и временных затратах [Инструкция по электроразведке, 1984].

Выбор оптимальной сети наблюдения и размера источника рассматривался в работах В.М. Бондаренко, В.В. Бродового, Г.С. Вахромеева, А.К. Захаркина, А.А. Никитина, А.Г. Тархова, Г.М. Тригубовича, В.К. Хмелевского и др.

Поскольку верхняя граница силы тока ограничена технически, площадь источника ЭМ поля является существенным параметром, влияющим на отношение сигнал/помеха, соответственно, на глубинность исследований и на *вертикальную разрешающую способность*. В свою очередь шаг между приемниками влияет на *горизонтальную разрешающую способность* и, таким образом, на возможность разделения и точность оконтуривания аномалий [Кауфман, Морозова, 1970; Захаркин, 1972].

Сигналы, возбуждаемые источником ЭМ поля, имеющего большую площадь, обладают большей амплитудой, и, соответственно, лучшим отношением сигнал/помеха, однако в силу инерционности большой петли неинформативны на ранних временах. И наоборот, сигналы, полученные с помощью источника ЭМ поля с меньшей площадью, информативны на ранних временах, но недостаточно чувствительны к нижней части разреза вследствие небольшого отношения сигнал/помеха. Влияние инерционности и недипольности установки представлено А.К. Захаркиным в методических рекомендациях по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой «Цикл» [1981].

Амплитуда сигнала определяется магнитным моментом источника ЭМ поля [Кауфман, Морозова, 1970] (1).

$$M = I \cdot S \cdot N, \quad (1)$$

где  $M$  – магнитный момент, ( $A \cdot m^2$ );  $I$  – сила тока, (А);  $S$  – площадь источника, ( $m^2$ );  $N$  – количество витков.

Существует формула для оценки эффективной глубины зондирования (2), однако в ней не отражено как влияние помеховой обстановки на сигнал, так и присутствие трехмерных неоднородностей [Матвеев, 1990].

$$H_{эф} = K \sqrt{\rho t}, \quad (2)$$

где  $H_{эф}$  – эффективная глубина зондирования, (м);  $K$  – коэффициент;  $\rho$  – сопротивление полупространства, ( $Om \cdot m$ );  $t$  – время становления поля, (с).

Еще одним принципиальным вопросом при проектировании работ методом ЗСБ является выбор сети наблюдений. Очевидно, что большее количество пунктов

наблюдений с минимальным расстоянием между ними обеспечивает наиболее точное картирование и погоризонтное расчленение геологического разреза. Однако работа с высокоплотной сетью сопряжена с большими финансовыми, временными и производственными затратами. В связи с этим при выборе сети наблюдений необходимо компромиссное решение между геофизической эффективностью и производственными приоритетами [Вахромеев, 1988; Гитарц, 1979].

Перед выбором сети наблюдения ЗСБ необходимо понять, какую часть зондируемой среды охватывает сигнал ЗСБ. Применительно к конкретным геоэлектрическим условиям оценить размер области, которую описывает конкретный сигнал ЗСБ (зона захвата поля), возможно только с помощью трехмерного математического моделирования [Матвеев, 1990; Рабинович, 1987; Дикмарова, 1968].

Формулы точного расчета размера зоны захвата не существует ввиду индивидуальности геоэлектрических условий зондируемой среды, однако можно приблизительно вычислить площадь зоны захвата на конкретной глубине по формуле (3) [Матвеев, 1990]:

$$S = \pi H^2, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь зоны захвата ( $\text{м}^2$ );  $H$  – мощность перекрывающих отложений (м).

Общепринятой методики выбора оптимальных геометрических параметров установки (размера источника и шага между приемниками ЭМ поля) в настоящее время не разработано, однако необходимость в ней есть.

В последние десятилетия в проведении съемки ЗСБ и методике интерпретации многое изменилось: улучшилась точность регистрации переходных характеристик ЭМ поля, повысилась детальность инверсии, и, наконец, появился доступный аппарат для трехмерного моделирования сигналов становления.

Методика, предлагаемая автором, основана на расчете сигналов для геолого-геоэлектрических условий района работ с учетом влияния трехмерного объекта, эквивалентного по геоэлектрическим и геометрическим параметрам объекту исследования. Образно говоря, такая методика позволяет оптимально «настроить» установку ЗСБ на решение конкретной геологической задачи.

Реальные (полевые) сигналы становления осложнены помехами различного происхождения (геологическими, техногенными, инструментальными и др.). Чтобы синтетические 3D данные соответствовали полевым, необходимо добавить к ним ЭМ помехи, которые по основным характеристикам должны отражать помеховую обстановку предполагаемого района работ. Выбор уровня помех при проведении моделирования выполнен автором с привлечением практических данных. Уровень помех оценивался по стандартному отклонению ЭДС помехи на основе анализа полевых записей, зарегистрированных при выключенном источнике ЭМ поля [Гусейнов, 2015]. Общий объем записей для территории Восточной Сибири превышает 80 000 измерений (материалы в архиве данных АО «ИЭРП»).

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих аномалию, является ее средняя (интегральная) амплитуда для всех ПК [Инструкция по электроразведке, 1984; Вахромеев, 1988]. В данной работе под *аномалией* понимается ЭДС, которая индуцируется на зажимах приемной петли вследствие становления ЭМ поля

трехмерного объекта (без учета ЭМ поля вмещающей среды). Добавкой к ЭДС объекта является вклад ЭМ помех (шум).

Интегральная амплитуда аномалии оценивается по формуле среднего арифметического (4):

$$\text{ЭДС}_{An} = \frac{\sum_{l=1}^n \text{ЭДС}_{Anl}}{n}, \quad (4)$$

где  $\text{ЭДС}_{An}$  – средняя амплитуда аномалии, (%);  $n$  – общее количество ПК.

*Критерием выделяемости аномалии* является её амплитуда. Считается, что, если амплитуда аномалии превышает уровень влияния на сигнал ЭМ помех более чем в 2 раза, она выделяема [Вахромеев, Давыденко, 1988].

В случае синтетического моделирования уровень накладываемых ЭМ помех известен, что позволяет оценить отношение аномалия/помеха.

Последовательность операций, необходимых для выбора геометрических параметров установки ЗСБ, представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Методика выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ

Формирование фоновой геоэлектрической модели <i>(типичной для геологических условий района работ)</i>
Задание геометрических и геоэлектрических параметров возмущающего объекта
Расчет сигналов ЗСБ с учетом влияния возмущающего объекта <i>(в нескольких вариантах с изменением длины стороны ГП)</i>
Наложение ЭМ помех на синтетические сигналы <i>(по своему уровню помеха накладывается большей или равной среднему уровню помех для предполагаемого района работ)</i>
Инверсия синтетических 3D кривых <i>(желательная, но не принципиально необходимая процедура)</i>
Расчет средних амплитуд аномалий, определение отношений сигнал/помеха, аномалия/помеха для сигналов от источников с разной стороной ГП
Визуализация результатов расчетов для ГП с разной длиной стороны <i>(построение геоэлектрических разрезов (карт) по результатам инверсии, разрезов (карт) аномального поля)</i>
Выбор оптимального размера источника ЭМ поля <i>(на основе анализа результатов расчета и амплитуд аномалий)</i>
Расчет средних амплитуд аномалий, определение отношений сигнал/помеха, аномалия/помеха для сигналов, полученных в зависимости от шага между ПК
Визуализация результатов расчетов при различном шаге между приемниками ЭМ поля

*(построение геоэлектрических разрезов (карт) по результатам инверсии, разрезов (карт) аномального поля для сигналов, полученных от источника с выбранной ранее стороной ГП)*

*Выбор оптимального расстояния между приемниками ЭМ поля (на основе анализа результатов расчета и амплитуд аномалий)*

Отметим принципиальную, в данном случае, необходимость трехмерного моделирования сигналов ЗСБ, применение которого позволяет оценить чувствительность кривых ЗСБ к неоднородности, находящейся как под, так и на удалении от ПК. То есть с помощью трехмерного моделирования можно выбрать размер сети наблюдений ЗСБ для выделения и/или оконтуривания исследуемого объекта.

### **Глава 3. Обоснование оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ применительно к геологическим условиям Непского свода**

В главе рассматривается выбор параметров установки ЗСБ для решения структурных задач в геологических условиях Непского свода (Восточной Сибири).

Как уже упоминалось, для производства трехмерных расчетов необходима фоновая геоэлектрическая модель, являющаяся основой трехмерного моделирования. В качестве фоновой принята осредненная геоэлектрическая модель Непско-Ботуобинской антеклизы, являющейся крупной геологической структурой на юге Сибирской платформы.

Фоновая геоэлектрическая модель включает 10 слоев с сопротивлением от 20 до 2000 Ом·м. На её основе произведены трехмерные расчеты, направленные на изучение аномалий от геологических неоднородностей. В соответствии с известной классификацией Г.С. Вахромеева и А.Ю. Давыденко [1988] выбранная модель относится к классу детерминированных ФГМ.

Круг характерных структурно-вещественных объектов осадочного чехла Сибирской платформы определен в монографии «Моделирование в разведочной геофизике» [Вахромеев, Давыденко, 1988]. Поскольку модели типичных неоднородностей определены, имеется возможность на основе интерпретационного опыта «ИЭРП» уточнить геометрические и геоэлектрические параметры неоднородностей и произвести трехмерные расчеты для моделей:

- 1) разломной зоны;
- 2) пласта-коллектора;
- 3) железорудного тела.

В зависимости от поставленной геологической задачи выбранные трехмерные объекты могут являться как объектами поиска, так и источниками ЭМ полей, усложняющих решение геологической задачи.

#### **Выбор источника ЭМ поля**

Трехмерное моделирование производилось для генераторных петель с длиной стороны 500 м, 600 м, 800 м и 1000 м. ГП упомянутых размеров традиционно используются для работ ЗСБ на юге Сибирской платформы.

Применительно к геологическим условиям Непского свода наиболее чувствительны к неоднородности в нижней части разреза сигналы, полученные от источника поля со стороны 1000 м. С одной стороны, такой сигнал имеет большую амплитуду и отношение сигнал/шум, что подтверждает низкий уровень дисперсии. С другой стороны, такие сигналы имеют неудовлетворительные показатели при изучении верхней части разреза (ВЧР). Кроме того, на самых ранних временах сигнал малоинформативен в силу инерционности больших ГП. При этом, чем больше источник, тем его инерционность значительнее. Следовательно, с большей глубины начинается полезный сигнал и, соответственно, ниже точность восстановления параметров ВЧР.

Сигналы от источника со стороны 500 м отличаются большей чувствительностью к неоднородностям в верхней части разреза. Это объясняется меньшими размерами ГП, а также инерционностью (чем меньше сторона ГП, тем быстрее происходит выключение тока; соответственно, изучение разреза начинается с более ранних времен). Однако на поздних временах сигналы от источника с длиной стороны 500 м имеют большой вклад дисперсии в силу небольшого момента источника, что значительно снижает информативность кривых ЗСБ.

Аномалии ЭДС, выявленные по сигналам от источников с длиной стороны 600 и 800 м, отличаются незначительно. Амплитуды истинных (без учёта ЭМ помех) аномалий по сигналам от упомянутых источников превышают уровень ЭМ помех более чем в 2 раза. Таким образом, аномалии надежно выделяются в разрезе.

Следует отметить, что с производственной точки зрения использование источника с длиной стороны 600 м более удобно и требует меньших трудозатрат по сравнению с источником с большей длиной стороны. Таким образом, подобный источник является оптимальным для картирования пород осадочного чехла Непского свода вследствие высокой чувствительности сигналов, зафиксированных от него, к строению верхней и нижней частей разреза, а также устойчивости к воздействию ЭМ помех [Семинский, Емельянов и др., 2016]. Очевидно, что наиболее достоверные результаты при изучении всего осадочного чехла до фундамента достигаются путем комплексного применения источников с меньшей и большей длиной стороны ГП.

### **Выбор шага между приемниками ЭМ поля**

Поскольку установлено, что в рассматриваемых геологических условиях 600 м является оптимальной длиной стороны генераторной петли, расчеты для сигналов от других источников во внимание не принимались.

Вследствие трехмерного моделирования изучена аномалия электромагнитного поля, средняя амплитуда которой зависит от шага между приемниками. Для оконтуривания неоднородностей большого размера (таких как разломная зона) шаг по профилю не имеет принципиального значения. Однако при изучении аномалий от нескольких небольших неоднородностей увеличение шага приводит к слиянию аномалий.

Трехмерные расчеты показали, что горизонтальные размеры аномалии ЭМ поля от глубокозалегающих объектов уменьшаются с увеличением шага между ПК. Согласно интерпретационному опыту автора, амплитуды аномалии 2 – 2.5% достаточно для надежного выделения объекта (при заданном уровне помех) [Семинский, Буддо и др., 2014]. Для обнаружения глубокозалегающих объектов, создающих такие аномалии, шаг

исследования должен составлять примерно 400 м. Исследования с подобным шагом позволяют выделить аномалии с горизонтальными размерами 1900 м и более. Работы по более плотной сети приводят к неоправданным временным и финансовым затратам.

При тестировании предложенного способа выбора параметров установки ЗСБ показано, что применительно к геологическим условиям Непского свода шаг 400 – 500 м является оптимальным для выделения в геологическом разрезе контрастных проводящих объектов [Семинский, Буддо и др., 2014].

#### **Глава 4. Комбинированный (1D и 3D) подход к интерпретации данных ЗСБ**

При интерпретации данных ЗСБ, полученных в условиях сложнопостроенных сред, часто возникает вопрос о корректности применения 1D инверсии. 1D инверсия имеет определенные преимущества по сравнению с 3D инверсией, главным из которых является меньшая невязка подбора геоэлектрической модели. Однако даже невязка менее 5% не гарантирует правильность подбора модели в силу эквивалентности решения [Тригунович, 2011].

Ситуация усложняется при влиянии трехмерных неоднородностей. В случае наличия зон осложненной интерпретации (невозможности подбора модели в рамках одномерной инверсии) целесообразно применять 3D-моделирование, исключающее грубые ошибки в интерпретации данных, но не отличающееся оптимальной точностью подбора модели [Агафонов, Шарлов и др., 2004].

С начала XXI века активно развивается полностью формализованный подход трехмерного подбора теоретических кривых к полевым (автоматическая трехмерная инверсия). В его основе лежит представление, что все нижнее полупространство неоднородно, и ограничивать интерпретацию одномерной инверсией не корректно [Тригунович, Персова, 2009]. Необходимо оценить эффективность применения одномерного и трехмерного подходов к инверсии данных в средах с различным геологическим строением.

#### **Интерпретация данных ЗСБ, полученных в геологических условиях Непского свода, на основе комбинированного применения 1D и 3D инверсии**

Целью проведенного исследования являлась оценка эффективности 1D и 3D инверсий данных ЗСБ применительно к средам со сложным геологическим строением в свете решения нефтегазопроисловых задач.

Сущность эксперимента заключалась в:

- 1) 1D и 3D инверсии данных, полученных на участке с горизонтально-неоднородным геологическим строением;
- 2) 1D и 3D инверсии данных, полученных на участке с горизонтально-однородным геологическим строением;
- 3) оценке прироста геологической информации в первом и во втором случаях.

#### **Участок с трехмерными неоднородностями**

Примером практического применения трехмерного моделирования при решении методом ЗСБ нефтегазопроисловых задач на юге Сибирской платформы выбрано месторождение «Модельное». Оно расположено в пределах южной периклинали

Непского свода – Непско-Ботуобинской антеклизы. Промышленная нефтегазоносность территории связана с подсолевыми горизонтами песчаников базальной ярактинской пачки в непской свите и верхнетирским горизонтом – в тирской свите нижнего венда.

Для западной части площади 1D инверсия кривых ЗСБ показала высокую эффективность: невязка подбора не превышала 1 – 1.5 %. Однако в восточной части территории кривые ЗСБ осложнены влиянием трехмерной неоднородности. Предположительно, это валообразная структура, которая характеризуется существенной неравномерностью внутреннего строения. Как правило, в условиях Сибирской платформы центральная часть вала представлена солями, а крылья – карбонатными породами (доломитами, известняками). В связи с этим не удалось добиться решения 1D обратной задачи с невязками менее 10 – 20 %. На рисунке 1 приведены результаты 1D инверсии кривых в виде карты распределения продольного сопротивления отложений подсолевой части разреза.

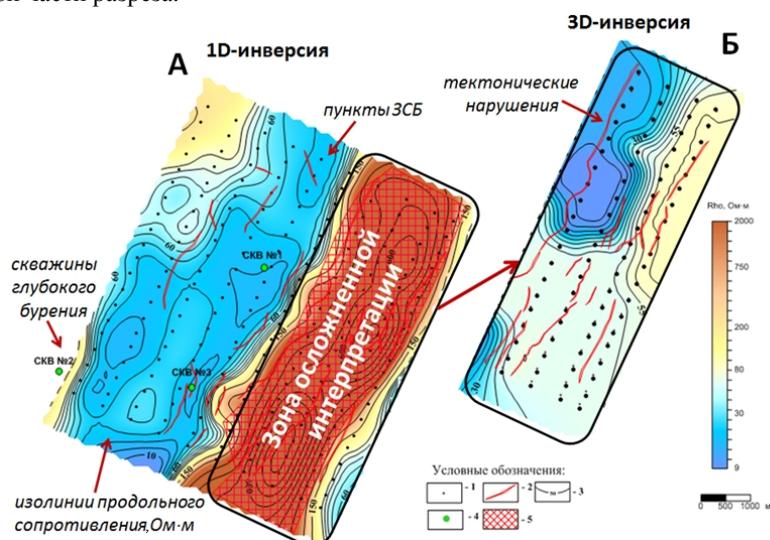


Рисунок 1 – Карты распределения продольного электрического сопротивления подсолевой части разреза по результатам 1D (А) и 3D (Б) инверсий: 1 – пункты ЗСБ (ПК); 2 – тектонические нарушения, выделенные по результатам сейсморазведочных работ; 3 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м; 4 – скважины глубокого бурения; 5 – зона осложненной интерпретации

Карта свидетельствует, что 1D инверсия кривых ЗСБ в восточной части участка неэффективна. Для учета влияния трехмерных неоднородностей была проведена 3D интерпретация материалов ЗСБ в программном комплексе «EMDataProcessor» [Тригубович, Белая и др., 2015] (Рисунок 1 Б). 3D инверсия сигналов ЗСБ для восточной части площади обеспечила невязку менее 10 %, что существенно меньше невязки в случае 1D. Вместе с тем, погрешность 3D инверсии в западной части площади оказалась

выше, чем при 1D инверсии. На северо-востоке участка применение 3D моделирования позволило определить УЭС подсолевой части разреза.

Таким образом, для получения наиболее достоверной геоэлектрической модели разреза целесообразно комбинирование результатов 1D и 3D инверсии: применение 1D подхода в западной части территории исследования и 3D – в восточной. Вследствие комбинирования результатов 1D и 3D подходов к интерпретации данных ЗСБ существенно модифицирована первичная геоэлектрическая модель участка «Модельного». Влияние тектонических неоднородностей разреза на сигналы ЗСБ было учтено, что позволило с необходимой точностью изучить геоэлектрические свойства подсолевой части разреза.

Судя по карте продольного сопротивления подсолевой части разреза, в западной части изучаемой территории в пределах зоны пониженного сопротивления выделяется область коллектора с преимущественно водным или смешанным типами насыщения. Она характеризуется свойственным данному виду коллектора сопротивлением – менее 40 Ом·м. На периферии выделенной области располагается СКВ №3 с притоками углеводородов (УВ), отмечается обводнение коллектора.

На западе выделена область с ухудшенными коллекторскими свойствами, в контуре которой располагается СКВ №2 без притока УВ и зоной ухудшенных фильтрационно-емкостных свойств.

На северо-востоке и востоке выделенная область граничит с участками развития коллектора с преимущественно УВ насыщением и характерным для данного типа коллектора сопротивлением 40 – 65 Ом·м. Зона коллектора с УВ насыщением в северо-восточной части простирается за пределы участка исследования в северном направлении, где располагается СКВ №1 с притоками УВ. Также отмечаются участки с ухудшенными коллекторскими свойствами и сопротивлением 65 – 80 Ом·м. Зоны с сопротивлением выше 80 Ом·м следует относить к областям, не являющимся коллекторами [Семинский, Буддо и др., 2016]. Впоследствии, в пределах зоны коллектора, выделенного по данным ЗСБ, был в результате бурения получен приток углеводородов.

### **Участок с горизонтально-слоистым строением**

В качестве еще одного примера применения 1D и 3D интерпретации данных ЗСБ были рассмотрены результаты работ на месторождении «Модельное-2», расположенном в центральной части Восточной Сибири.

Промышленные притоки нефти и газа в данном районе связаны с терригенно-карбонатными отложениями венд-нижнекембрийского подсолевого терригенно-карбонатного и галогенно-карбонатного нефтегазоносных комплексов. В их составе выделяются продуктивные горизонты: верхнечонский, преображенский, усть-кутский, осинский. Они сложены песчаниками с прослоями аргиллитов, алевролитов и в редких случаях гравелитов. Образование коллекторов в этих горизонтах контролируются постседиментационными процессами, которые связаны с эпигенетической карбонатизацией, сульфидизацией, регенерацией и особенно засолонением. Упомянутые процессы нарушили связь между литологическими и физическими параметрами.

Невязка решения обратной задачи при 1D инверсии варьируется в диапазоне от 0.5 до 1.5%, что свидетельствует об отсутствии (или слабом влиянии) трехмерных неоднородностей в пределах рассматриваемого месторождения.

Для выявления возможности получения дополнительной геологической информации за счет трехмерных моделей была проведена 3D инверсия (модельные расчеты М.Г. Персовой). Невязки подбора составили 3-5 %.

Результаты 1D и 3D инверсии в виде разрезов удельного электрического сопротивления представлены на рисунке 2. Между результатами 1D и 3D инверсии принципиальных отличий не выявляется. По данным каротажа скважин и петрофизических расчетов установлен диапазон сопротивлений верхнечонского горизонта-коллектора – 25-40 Ом·м.

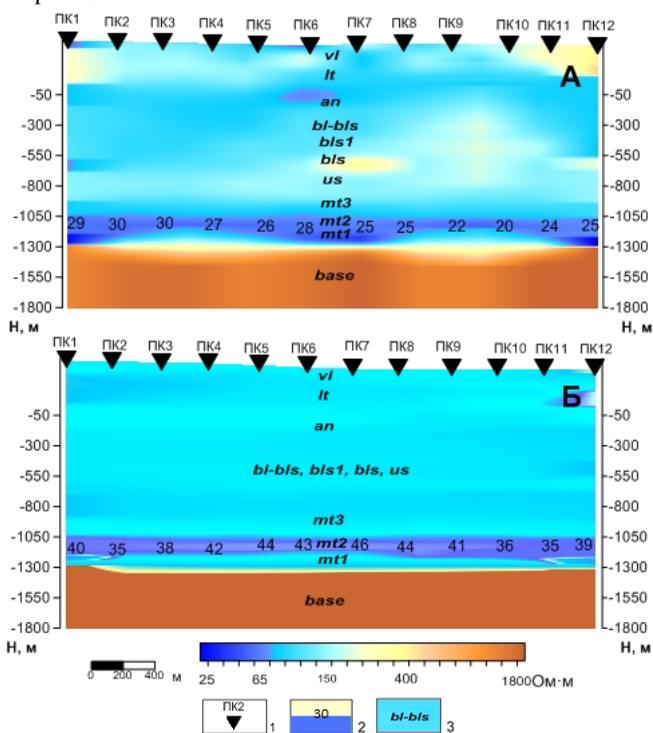


Рисунок 2 – Разрезы УЭС осадочной толщи месторождения «Модельное-2» на Непском своде, построенные по результатам 1D (А) и 3D (Б) инверсий:  
 1 – пункты наблюдения ЗСБ; 2 – значение удельного электрического сопротивления, Ом·м; 3 – стратиграфический идентификатор

Геологическая интерпретация результатов 1D и 3D инверсии данных ЗСБ на месторождении «Модельное-2» подтверждает схожесть прогнозов. Принципиальный

прирост геологической информации вследствие проведения трехмерной инверсии в условиях строения разреза близкого к горизонтально-слоистому не установлен. Отметим, что детальность результатов трехмерной инверсии ввиду аппроксимации разреза несколькими объектами уступает одномерной инверсии. По сравнению с 1D инверсией, трехмерное моделирование – процесс ресурсоемкий, т.е. при работе с горизонтально-слоистым разрезом (или близким к нему) в производственных интересах целесообразно ограничиваться одномерным подходом к интерпретации данных.

### Ранжирование кривых ЗСБ по степени влияния 3D неоднородностей

Как было установлено в результате комплексной инверсии данных ЗСБ, применение определенного подхода к интерпретации должно диктоваться степенью «неоднородности» зондируемого пространства. Необходимо понять, какой ее уровень не позволяет в рамках 1D инверсии изучить геологический разрез с достаточной точностью. Требуется численные критерии необходимости применения 1D/3D инверсии. Для получения таких критериев проведен модельный эксперимент, направленный на картирование пород осадочного чехла и выделение насыщенного углеводородами горизонта-коллектора в подсолевой части разреза.

Автором были сгенерированы синтетические кривые от фоновой модели, включающей УВ-насыщенный пласт-коллектор в подсолевой части разреза (Рисунок 3).

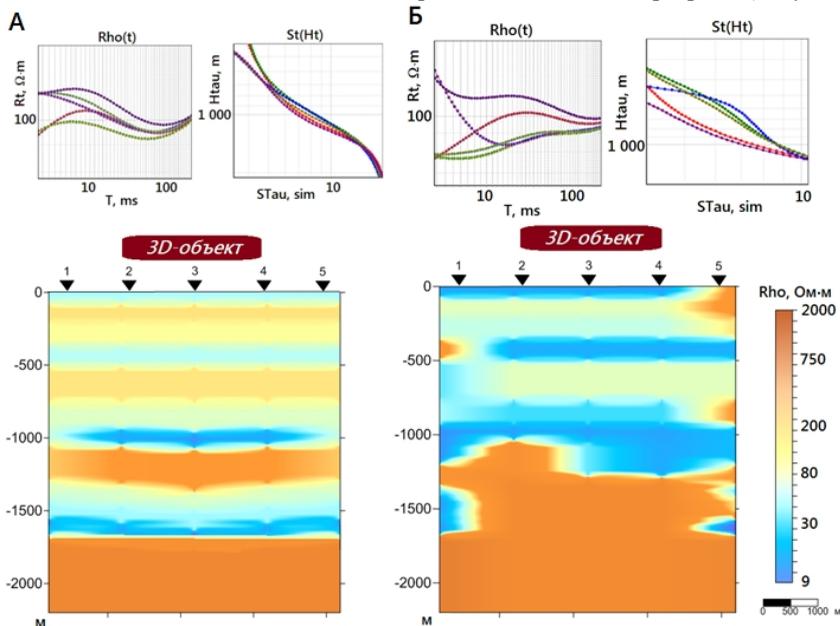


Рисунок 3 – Разрезы УЭС по результатам одномерной инверсии кривых ЗСБ, осложненных влиянием интрузии (над разрезами – проекция интрузии на дневную поверхность и трансформанты синтетических кривых ЭДС) с сопротивлением:

А – 20 Ом·м; Б – 2 Ом·м

Кривые осложнены влиянием перекрывающей неоднородности (предположительно – пластовой трапповой интрузией в надсолевой части разреза).

Как показали расчеты, среднеквадратическое расхождение между кривыми  $\rho_t$  от одного источника составляет  $\approx 8\%$ . Далее была проведена одномерная инверсия кривых (Рисунок 3 А).

По результатам инверсии средняя невязка между теоретической и практической кривыми составила 5%. Как показала 1D инверсия, геоэлектрические свойства трапповой интрузии, фоновой модели и, в частности, пласта-коллектора в подсолевой части разреза определены с приемлемой точностью.

После этого, с целью усложнения задачи изучения геоэлектрических свойств осадочного чехла для интрузии было задано УЭС равное 2 Ом·м. Как видно на рисунке 3 Б, среднее квадратическое расхождение между кривыми  $\rho_t$  от одного источника составило примерно 14 %. В среднем невязки одномерной инверсии превысили 15 %. Такая невязка не позволяет изучить геоэлектрические свойства осадочного чехла и трапповой интрузии.

Отметим, что, кроме рассмотренных выше, факторами, осложняющими одномерную инверсию, являются эффекты индукционно вызванной поляризации (ИВП) и магнитной вязкости (МВ). Зачастую проявление этих эффектов трудно отличить от влияния «неоднородности» зондируемого пространства. Тем не менее, упомянутые эффекты можно диагностировать с помощью использования многоразностных установок. Как известно, МВ и ИВП сильнее всего проявляются на ПК, находящихся в контуре генераторной петли. В случае присутствия трехмерных неоднородностей, как правило, осложнены все ПК независимо от разнаса. В связи с этим, можно предположить, что отличие кривой соосного ПК от других (в рамках одной установки) обусловлено преимущественно эффектами ИВП и МВ.

Исходя из вышеизложенного, «границными уровнями (критериями) трехмерности» являются:

1) невязка подбора теоретической кривой к практической (в рамках одномерной инверсии) более 10 %;

2) среднеквадратическое расхождение кривых  $\rho_t$  от одной установки более 10%.

Эти критерии являются оценочными, однако модельный эксперимент подтвердил, что их применение обосновано особенно на первых этапах интерпретации.

Используя современное программное обеспечение, базу данных зондирований и предложенные критерии, автором проведена оценка «размерности» кривых ЗСБ, зарегистрированных на юге Сибирской платформы. На рисунке 4 приведена статистическая диаграмма для оценки «размерности» кривых ЗСБ, построенная на основе анализа 80 000 физических наблюдений из архива «ИЭРП».

Отметим, что при оценке «размерности» кривые, осложненные эффектами МВ и ИВП, были исключены из статистических расчетов. Оценка проводилась на основе отклонения группы разнесенных кривых относительно друг друга для одной ГП в программе «EMQC» [Гусейнов, 2015].



Рисунок 4 – Диаграмма для оценки «размерности» кривых ЗСБ на основе выборки из 80000 физических наблюдений (юг Сибирской платформы)

Как показывает рисунок 4, 70 % данных ЗСБ, полученных на площадях юга Сибирской платформы, соответствует горизонтально-слоистой среде, а 11% – горизонтально-слоистой с присутствием трехмерных неоднородностей. Кроме этого, имеется область неоднозначной оценки, к которой относятся 19% данных. Наибольшее количество осложненных кривых зарегистрировано в северной части юга Сибирской платформы, что может объясняться присутствием в геологическом разрезе магматических тел.

Таким образом, имеющиеся на сегодняшний день средства для интерпретации данных ЗСБ, основанные на 3D моделировании, не всегда обеспечивают лучший геологический результат по сравнению с 1D инверсией. Несомненно, средства 3D инверсии данных ЗСБ развиваются, и точность подбора модели увеличится, но на данный момент наилучшим способом получения оптимального результата является комбинирование 1D и 3D подходов.

### **Заключение**

Основные результаты проведенных исследований состоят в оптимизации методики ЗСБ для геологических условий юга Восточной Сибири средствами 3D моделирования и в основном сводятся к следующему.

Разработан методический подход, применение которого повышает информативность зондирований на предполевом этапе работ путем выбора оптимальных геометрических параметров установки ЗСБ. Методика позволяет «настраивать» установку на выявление главных особенностей конкретного геологического разреза, обеспечивая при этом не только решение задачи на заданном уровне, но и оптимизацию производственных затрат.

Посредством применения указанной методики определены и численно обоснованы размеры установки ЗСБ применительно к геологическим условиям Непского свода. С помощью установки (длина стороны генераторной петли – 600 м; расстояние между ПК – 400-500 м) стало возможным уверенное выделение (на высоком уровне ЭМ помех) ряда структурных объектов, типичных для осадочного чехла рассматриваемой территории.

Произведена оценка одномерности данных ЗСБ, полученных для юга Сибирской платформы, на основе эмпирически обоснованных численных критериев. Установлено, что большая часть объема электроразведочных данных достоверно интерпретируются в рамках горизонтально-слоистой модели, что по большому счету обеспечивает правомерность применения одномерной инверсии при обработке материалов зондирований в изучаемом регионе.

Определен уровень прироста геологической информации вследствие применения трехмерного моделирования для случаев горизонтально-однородной и горизонтально-неоднородной сред. Установлена принципиальная необходимость применения 3D моделирования при превышении допустимого уровня «неоднородности», т.е. осложнения кривых влиянием трехмерной неоднородности. Использование одномерной инверсии в базовой части интерпретации данных ЗСБ и 3D моделирования для особых случаев горизонтально-неоднородных сред повышает возможности метода для решения нефтегазопроисловых и структурных задач на территории юга Сибирской платформы.

В целом проведенные исследования позволяют вывести интерпретацию ЗСБ на новый качественный уровень за счет привлечения на всех этапах работ трехмерного моделирования.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В журналах перечня ВАК:

1. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., **Семинацкий И.К.** К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 88 (5). – С. 53-62.

2. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Токарева М.Г., Алексеева Е.Д., Блинова М.Е., Гусейнов Р.Г., Давыденко М.А., Егоров И.В., Ерпулев А.А., Кандакова Т.А., **Семинацкий И.К.**, Трусов А.А., Яковлев С.В. Применение программных комплексов Geo-EM и WebGEM для решения научных и практических задач геоэлектроразведки // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4 (53). – С. 12-24.

3. **Семинацкий И.К.**, Буддо И.В., Сузов Л.В., Агафонов Ю.А. Опыт 3D моделирования сигналов становления электромагнитного поля в условиях осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 65. – С. 49-53.

4. **Семинацкий И.К.**, Емельянов В.С., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Макаров А.А., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального размера источника электромагнитного поля в методе ЗСБ для геологических условий Иркутской области // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук: геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2017. – № 2 (40). – С. 75-88.

5. **Семинацкий И.К.**, Ильин А.И., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального шага между приемниками ЗСБ посредством 3D моделирования для геологических условий Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук: геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2014. – № 4 (47). – С. 56-63.

### В сборниках трудов:

6. **Семинацкий И.К.** К вопросу о повышении информативности ЗСБ // Материалы IV Всероссийского научно-практического семинара с международным участием им. Г.С. Вахромеева. – Иркутск. – 2017 (электронный сборник).

7. **Семинацкий И.К.**, Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А., Белая А.А., Тригубович Г.М. Опыт комбинирования 1D и 3D подходов интерпретации материалов ЗСБ при решении нефтегазопоисковых задач в Восточной Сибири // IV Международная научно-практическая конференция «ГЕОБАЙКАЛ-2016: Расширяя горизонты. От Восточной Сибири до Тихого океана – геология, разведка и разработка»: Сборник трудов. – Иркутск: Изд-во EAGE Publications BV. – 2016 (электронный сборник).

8. **Семинацкий И.К.**, Гусейнов Р.Г., Жаргалов Б.Б., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимальной сети наблюдения для метода ЗСБ посредством 3D моделирования для геологических условий Восточной Сибири // III Международная научно-практическая конференция «ГЕОБАЙКАЛ-2014: Разведка и разработка недр Восточной Сибири»: Сборник трудов. – Иркутск: Изд-во EAGE Publications BV. – 2014 (электронный сборник).

9. **Семинацкий И.К.**, Емельянов В.С., Гусейнов Р.Г., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Выбор оптимального размера источника электромагнитного поля в методе ЗСБ для геологических условий Восточной Сибири // X Международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика-2015»: Тезисы докладов. – СПб: СПбГУ, Изд-во ВВМ, 2015. – С. 72-75.