

На правах рукописи



МУРЗИНА ЕКАТЕРИНА ВИКТОРОВНА

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИНВЕРСИИ КРИВЫХ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ
ПРИ РЕШЕНИИ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Научный руководитель **Поспеев Александр Валентинович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа ФГБУН ИЗК СО РАН.

Официальные оппоненты **Антонов Евгений Юрьевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук» (ФГБУН ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск.

Хасанов Ибрагим Мубаракovich, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук» (ФГБУН СВКНИИ ДВО РАН), г. Магадан.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» (ФГБОУ ВО МГУ), г. Москва.

Защита состоится «05» октября 2022 года в 09-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.irk.ru/images/upload/newsfull224/3509.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «02» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.003.022.03,
кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Эффективность поисков и разведки месторождений нефти и газа на юге Сибирской платформы обеспечивается применением прогрессивных геофизических технологий. Последние десятилетия активно развивается электроразведка методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Значительные объемы работ методом ЗСБ выполняются по регулярным высокоплотным сетям наблюдений (ЗСБ 3D), совмещенным с площадной сейсморазведкой методом общей глубинной точки (МОГТ 3D). Применение ЗСБ 3D вызвало необходимость разработки автоматизированной методики инверсии данных, так как использование поточечной инверсии не всегда позволяет получать оптимальный результат, соответствующий априорной информации.

Кроме того, важным этапом камеральных работ является объективная оценка качества инверсии. Оптимальность результата инверсии определяется посредством ошибки подбора – достигаемого в ходе инверсии расхождения практической и теоретической кривых ЗСБ, или невязки [Матвеев, 1990; Oldenburg, 2005; Могилатов, 2002, 2007; Жданов, 2017]. При переходе к детальным моделям сред сложность решения обратной задачи связана с больш́ей размерностью пространства параметров. Неединственность решения обратной задачи геофизики [Светов, 1973; Жданов, 2012] требует использования способов регуляризации ее решения путем привлечения априорной информации [Тихонов, Арсенин, 1986], что иногда бывает не применимо на практике. Во-первых, не всегда имеется достаточное количество априорной информации. Во-вторых, непонятно, в какой мере можно «распространять» типичную геоэлектрическую модель среды, полученную в одной точке исследуемой среды на основании данных бурения скважин по площади. Становится актуальным построение более унифицированных алгоритмов регуляризации, адаптированных под поставленные нефтегазопроисследовательские задачи, чему посвящена первая глава диссертации.

Кроме того, важным аспектом является объективная оценка результата инверсии. При решении нефтегазопроисследовательских задач часто возникает вопрос о надежности прогноза и об ошибке, которая может быть заложена в результат интерпретации данных ЗСБ. Во второй главе рассмотрены подходы, направленные на оценку качества результата интерпретации данных ЗСБ, позволяющие получить как общее представление о результате решения обратной задачи ЗСБ, так и детальное представление об ошибке изучения целевых интервалов и о возможности их восстановления.

В третьей главе представлены примеры применения предложенных подходов к данным, зарегистрированным на территории Непско-Ботуобинской антеклизы.

Степень разработанности проблемы

С начала работ методом ЗСБ на юге Сибирской платформы геоэлектрическая модель уточнялась по мере того, как совершенствовались средства измерения и интерпретации данных. Развитие программных средств инверсии и повышение точности ЗСБ позволили реализовать детальную интерпретацию данных.

Поскольку в настоящее время возможности трехмерной инверсии технически ограничены, в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы основной методикой инверсии данных ЗСБ 3D является 1D-инверсия [Панкратов, Турицин, 1987; Семинский, 2017; Поспеев и др., 2018a; Буддо, 2012; Buddo et al., 2012; Буддо и др., 2018; Компаниец и др., 2019]. Чаще всего реальные модели сред аппроксимируются условно горизонтально-слоистыми моделями сред [Поспеев и др., 2018a; Компаниец и др., 2019; Семинский, 2017], заключающими в себе незначительные изменения (не более 30 %) по латерали, связанные с появлением проводящих горизонтов-коллекторов. Такие модели далее мы будем называть условно или квазигоризонтально-слоистыми [Колесников, 1995].

Автоматизация инверсии данных нестационарных зондирований требует использования эффективных алгоритмов регуляризации. При решении нефтегазопроисследовательских задач снижение эквивалентности решения достигается использованием структурного каркаса среды по

данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018а; Компаниец и др., 2019; Буддо и др., 2021]. При этом возможно приблизить детальность интерпретационной модели к реальной модели распространения горизонтов-коллекторов юга Сибирской платформы.

Проблемой, осложняющей геологическую интерпретацию результатов поточечной инверсии данных нестационарных зондирований, являются латеральные вариации удельного электрического сопротивления (УЭС) горизонтов, связанные с влиянием ошибок наблюдений на результат интерпретации. В настоящей работе предлагается методический подход, заключающийся в использовании функции пространственной невязки. Оптимизирующий функционал при этом рассчитывается как пространственная функция от локальных невязок.

Кроме того, переход к изучению геоэлектрических параметров целевых интервалов требует дополнительной оценки точности и устойчивости решения обратной задачи при переходе к изучению детальных квазигоризонтальных моделей сред. Также актуальной является задача контроля качества результата инверсии геоэлектрических моделей, получаемых в процессе интерпретации.

В связи с этим **целью исследования** являлось повышение надежности определения геоэлектрических параметров моделей в квазигоризонтально-слоистых средах по данным ЗСБ путем разработки подходов повышения устойчивости решения обратной задачи при производстве работ ЗСБ по плотной сети наблюдений, а также критериев и алгоритмов, направленных на экспрессную оценку результата инверсии.

Задачи исследования

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

- средствами математического моделирования оценить возможности 1D-инверсии при изучении квазигоризонтально-слоистых сред и обосновать принцип пространственного накопления при инверсии данных ЗСБ;
- обосновать количественную оценку ошибки УЭС при помощи статистических алгоритмов инверсии;
- разработать методические рекомендации по оценке качества инверсии данных ЗСБ и проиллюстрировать возможность повышения геологической надежности результата инверсии при решении нефтегазопоисковых задач.

Объект исследования

В данной работе объектом исследования является разрез осадочного чехла юга Сибирской платформы.

Защищаемые научные результаты

Защищаемыми научными результатами стало следующее:

- 1) применение пространственного фильтра при инверсии кривых ЗСБ в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей повышает устойчивость решения обратной задачи;
- 2) коэффициент вариации, получаемый в процессе инверсии данных ЗСБ статистическими методами, отражает ошибку определения УЭС слоя, которая зависит от контрастности изучаемого параметра и качества полевого материала;
- 3) комплексный критерий качества инверсии, использующий предложенные в работе количественные критерии, является удобным инструментом оперативной оценки надежности результатов инверсии.

Научная новизна работы

Применительно к типичному разрезу юга Сибирской платформы впервые предложена и опробована методика инверсии данных площадных электромагнитных зондирований, направленных на решение нефтегазопоисковых задач в детальных квазигоризонтально-слоистых средах основанная на регуляризации решения обратной задачи путем учета результата решения обратной задачи на соседних точках зондирований.

Впервые предложен и применен подход, позволяющий получить оценку ошибки определения УЭС по данным ЗСБ в каждой точке зондирований путем накопления статистики в процессе решения обратной задачи методом Монте-Карло.

На основании проведенного моделирования впервые предложен подход определения «латеральной выдержанности» моделей квазигоризонтально-слоистого разреза. Предложен подход, направленный на оценку результата автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований, основанный на комбинировании погрешности решения обратной задачи и латеральной выдержанности разреза. Разработана методика оценки качества инверсии сигналов становления, которая в совокупности с результатом оценки качества полевого материала позволяет получить представление о причине возникновения ошибки в процессе решения обратной задачи.

Теоретическая значимость

Предложен подход расчета функционала оптимизации путем задания весовой функции в соответствии с эффективным радиусом токового кольца. Оценена возможность 1D-инверсии данных ЗСБ при решении нефтегазопроисловых задач при применении регулярной сети наблюдений. Рассчитан фильтр, описываемый гауссовой функцией, применение которого при инверсии позволяет дополнительно к имеющейся априорной информации получать устойчивую геоэлектрическую модель среды.

На основании полученных в результате синтетического моделирования зависимостей показана возможность применения метода Монте-Карло с элементами «имитации» отжига в качестве инструмента оценки ошибки определения УЭС при изучении коллекторских свойств перспективных горизонтов методом ЗСБ.

Предложенный подход оценки качества инверсии позволяет оперативно проводить контроль полученного результата решения обратной задачи. Определение латеральной выдержанности при инверсии кривых ЗСБ позволяет исключить возникновение ошибок интерпретации, связанных с качеством полевого материала.

Практическая значимость результатов

Разработанные алгоритмические и программные средства внедрены в производственный процесс ООО «СИГМА-ГЕО» и показали высокую эффективность при интерпретации массовых данных ЗСБ. Усовершенствование методики инверсии данных площадных ЗСБ в рамках квазигоризонтально-слоистых сред повысило достоверность результатов интерпретации материалов импульсной индуктивной электроразведки и позволило избежать ошибок геологической интерпретации.

Методика оценки результата инверсии данных ЗСБ обеспечила оперативный контроль качества получаемого результата инверсии. Применение методики повысило надежность определения геоэлектрических параметров при инверсии кривых ЗСБ.

Личный вклад

Личный вклад автора заключается в следующем:

– для имитации реальной модели среды при помощи 3D-алгоритмов были рассчитаны переходные характеристики; оценена возможность восстановления переходных характеристик, рассчитанных посредством 3D-моделирования, с помощью 1D-инверсии; на основании проведенного моделирования предложен подход расчета пространственной невязки; выполнена оценка применимости подхода пространственного накопления путем расчета пространственной невязки на практических и синтетических данных;

– разработаны методические рекомендации для оценки ошибки определения УЭС в ходе инверсии методом Монте-Карло;

– разработана методика оценки качества инверсии данных ЗСБ; введено понятие «латеральной выдержанности» разреза, предложена численная мера ее оценки;

– проинтерпретированы данные ЗСБ, полученные ООО «СИГМА-ГЕО» до 2022 г., и выполнена апробация методик на эталонных участках юга Сибирской платформы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 25.00.10

Согласно паспорту научной специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» диссертационная работа соответствует пунктам № 4, № 11, № 12, № 15, № 24:

Пункт № 4. Исследование природы, свойств и геодинамической интерпретации деформационных характеристик и естественных геофизических полей, источники которых располагаются в недрах Земли. Поля, индуцированные во внешних оболочках Земли, также могут быть объектом исследования в рамках данной специальности, если они либо используются для изучения внутренней структуры Земли, либо характеризуют взаимодействие различных оболочек Земли (включая твердые оболочки). Взаимодействие деформационных и геофизических полей.

Пункт № 11. Математические и численные исследования в теории прямых и обратных задач сейсмологии, геоэлектрики, гравиметрии, магнитометрии, геотермики, ядерной геофизики, включая геофизические методы разведки, скважинную и инженерную геофизику.

Пункт № 12. Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач геофизики, методов аппроксимации геофизических полей, цифровой фильтрации с целью повышения разрешающей способности методов и подавления помех, построения изображений, соответствующих компьютерных технологий и их применение в геолого-геофизической практике при условии достаточной новизны в чисто математической части работы.

Пункт № 15. Компьютерные системы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных.

Пункт № 24. Контроль разработки месторождений полезных ископаемых по данным наземных и скважинных геофизических исследований.

Фактические материалы и методы исследований

При решении поставленных задач автор опирался на работы: Л.Л. Ваньяна, А.А. Кауфмана, Б.И. Рабиновича, J.D. McNeill, В.А. Сидорова, В.В. Тикшаева, М.С. Жданова, К.С. Турицына, М.И. Эпова, А.К. Захаркина, Е.Ю. Антонова, Н.О. Кожевникова, В.С. Могилатова, А.В. Поспеева, И.В. Буддо, А.Н. Шеина, Ю.А. Агафонова и других исследователей. Разработка методики оценки качества инверсии данных ЗСБ продолжает работу Р.Г. Гусейнова, являющегося автором системы контроля качества полевых данных ЗСБ под названием ЕМҚС.

Основными методами исследования, примененными в работе, стали численное моделирование переходных характеристик и их сравнительный анализ. Дополнительно проводились полевые эксперименты, обработка и инверсия полученных данных, а также статистический анализ информации.

Для моделирования использовалось современное программное обеспечение Model 3 и Model 4, реализующее автоматизацию 1D-инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований, разработанное на базе программно-алгоритмических средств SGS-TEM (Ю.А. Агафонов, М.В. Шарлов, Л.В. Суров, В.С. Емельянов). В его основе лежат алгоритмы решения прямых и обратных задач ЗСБ, разработанные специалистами Института нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука (Е.Ю. Антонов, М.И. Эпов и др.), а также специалистами компании «Зонд-Гео» (А.Е. Каминский). Моделирование 3D-сигналов становления осуществлялось в среде GeoEM (М.Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик), интегрированной в комплекс Model 3.

В основу диссертационной работы положены материалы, собранные автором за время работы в ООО «СИГМА-ГЕО». К данным материалам можно отнести результаты электро-разведочных работ методом ЗСБ (более 15000 ф. н.), выполненных с применением цифрового телеметрического программно-аппаратного комплекса электро-разведочной станции SGS-TEM по высокоплотным регулярным сетям наблюдений на нескольких лицензионных участках Восточной Сибири.

Основными методами исследования, использованными в ходе работы, стали численное моделирование переходных характеристик в квазигоризонтально-слоистых средах и их сравнительный анализ. Автором также проведены статистические процедуры инверсии для оценки погрешности определения УЭС. Применены инверсия данных ЗСБ и статистический анализ информации.

Апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертации были представлены на конференциях и семинарах различного уровня: на XII научно-практическом семинаре «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), на XVI ежегодной научно-практической конференции «Игошинские чтения» (г. Иркутск, 2016 г.), на Международной научно-практической конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2017 г.), на IV Всероссийском научно-практическом семинаре с международным участием имени Г.С. Вахромеева (г. Иркутск, 2017 г.), на ежегодной Международной геолого-геофизической конференции и выставке «Инновации в геонауках» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.), на Международной конференции «ГеоБайкал» (г. Иркутск, 2012, 2016, 2018, 2020 гг.).

По теме диссертации опубликовано более 17 научных работ, среди которых коллективная монография, 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии, и более 11 статей в сборниках материалов и тезисов международных и всероссийских конференций.

Объем и структура работы

Научно-квалификационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Объем работы составляет 113 страниц. Работа включает 52 рисунка, 8 таблиц. Библиографический список используемых источников содержит 163 наименования.

Благодарности

За формирование научных взглядов, а также руководство над диссертационным исследованием автор выражает благодарность научному руководителю профессору А.В. Поспееву.

За поддержку в ходе выполнения диссертации и ценные советы автор признателен генеральному директору ООО «СИГМА-ГЕО» кандидату технических наук Ю.А. Агафонову и исполнительному директору ООО «СИГМА-ГЕО» М.В. Шарлову.

Отдельную благодарность за активную поддержку при написании работы и конструктивную критику автор выражает кандидату геолого-минералогических наук И.В. Буддо. За ценные советы, замечания и обсуждение отдельных вопросов и работы в целом автор благодарит профессора Н.О. Кожевникова.

За помощь в воплощении идей и участии в проведении синтетического моделирования, а также за ценные советы автор признателен В.В. Гомульскому и кандидату геолого-минералогических наук И.К. Семинскому. За воплощение идей по подходам к инверсии данных ЗСБ с учетом пространственной невязки и оценки качества инверсии в виде компьютерных программ автор благодарен В.С. Емельянову.

Успешному выполнению исследований во многом способствовали доброжелательное отношение и поддержка коллектива ООО «СИГМА-ГЕО». За помощь в работе с геолого-геофизическими материалами автор благодарен Д.Б. Немцевой, И.А. Шелохову, О.В. Токаревой, Е.В. Печаткиной, И.В. Акуловой.

Автор благодарен сотрудникам кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Иркутского национального исследовательского технического университета, в том числе А.В. Мироманову и Ю.А. Давыденко, за ценные советы, комментарии и обсуждения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Инверсия данных зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопроисследовательских задач в условиях геологического разреза юга Сибирской платформы

Конечной целью анализа геофизических полей являются геологические модели, теоретические отклики над которыми совпадают с наблюдаемыми данными. Численное моделирование переходных характеристик для параметров заданной модели обычно называют прямой задачей. Для процесса оценки параметров модели по наблюдаемым данным используется обратная задача, или инверсия [Жданов, 2007]. Решение обратной задачи заключается в определении параметров изучаемой среды, оценке геологической совместимости с данными наблюдений и в определении приближенных решений для принятой модели [Жданов, 2012].

Расхождение практической и теоретической кривой ЗСБ (невязка) является основным минимизируемым параметром при инверсии [Oldenburg et al., 2005; Могилатов, 2002; Могилатов и др., 2007; Жданов, 2012]. На практике обычно используется среднеквадратическая погрешность, которая измеряет различия между данными предсказанными ρ^{pr} и наблюдаемыми ρ^{obs} значениями кажущегося сопротивления [Жданов, 2012]. С учетом логарифмической шкалы представления сопротивления формула невязки имеет следующий вид:

$$\delta_{ln(\rho)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\ln(\rho_n^{pr}) - \ln(\rho_n^{obs}))^2}{N - 1}}. \quad (1)$$

Прямая задача всегда корректно поставлена, то есть одной модели среды в ней соответствует одно уникальное решение уравнений Максвелла, описывающее поведение электромагнитного поля. Обратная же задача [Тихонов, Арсенин, 1986; Самарский, Вабищев, 2009] в отличие от прямой поставлена некорректно. После появления алгоритмов регуляризации решение обратной задачи ищется обычно на основе минимизации параметрического функционала Тихонова, который добавляется в качестве весовой функции к функции невязки [Тихонов, Арсенин, 1986; Матвеев, 1990], данный подход не всегда применим на практике.

В 1994 г. появились первые алгоритмы, направленные на применение подхода латеральной инверсии, которые были представлены зарубежными исследователями Д.У. Ольденбургом и Я. Ли [Oldenburg, Li, 1994], М.Х. Локе и Р.Д. Баркером [Loke, Barker, 1996], а также Р.В.Л. Пиньейру [Pinheiro, 1997]. Далее для обеспечения латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистой среды ограничения для модельных данных начали задаваться при помощи ковариационных матриц шероховатости, построенных на основе априорной информации и применяемых к вектору параметров модели [Auken et al., 2002; Auken, Christiansen, 2004; Monteiro Santos, 2004; Monteiro Santos, 2004]. Данный подход называется латеральной ограниченной инверсией (*англ.*: lateral constrained inversion, LCI). Подход 1D-LCI позволяет создавать псевдо 2D-модели, в которых изменения удельного сопротивления являются плавными.

Наиболее современным направлением, часто применяемым при интерпретации данных электромагнитных зондирований, является совместная инверсия [Гольцман, Калинина, 1973; Gao et al., 2012; Nabashy, Abubakar, 2004; Спичак, 2005]. В качестве одного из примеров в этом направлении можно привести совместную инверсию данных сейсморазведки, бокового каротажа и электроразведки методом CSEM (*от англ.* controlled-source electromagnetics), разработанным в 1980-е гг. в американском Скрипсовском океанографическом институте [MacGregor, 2015].

Схожий подход применяется при решении нефтегазопроисследовательских задач в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы. При незначительном контрасте параметров разреза основной методикой инверсии данных ЗСБ является интерпретация в рамках горизонтально-слоистой модели [Панкратов, Турицин, 1987; Семинский, 2017; Поспеев и др., 2018a; Буддо, 2012; Buddo et al., 2012; Буддо и др., 2018]. При решении нефтегазопроисследовательских задач



Рис. 1 – Блок-схема системы оценки качества данных зондирования становлением поля в ближней зоне

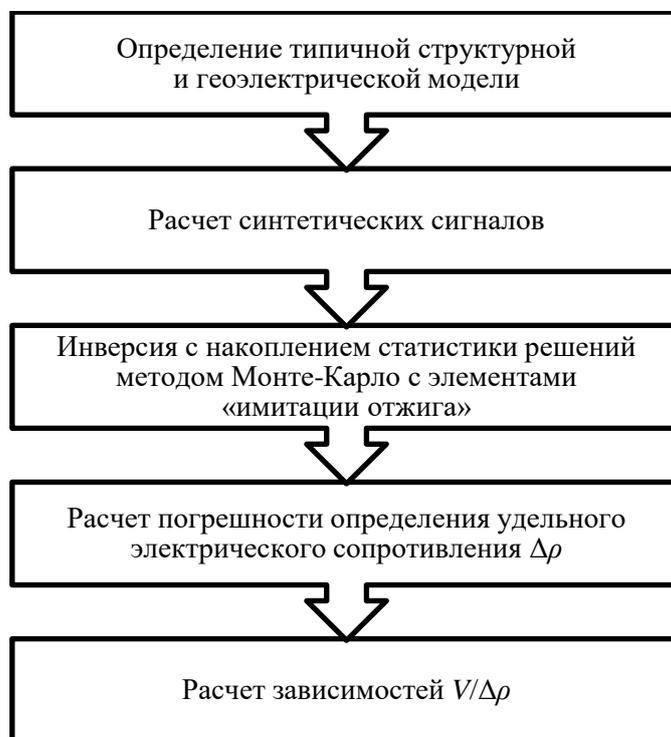


Рис. 2 – Схема последовательности расчета ошибки определения удельного электрического сопротивления горизонта-коллектора

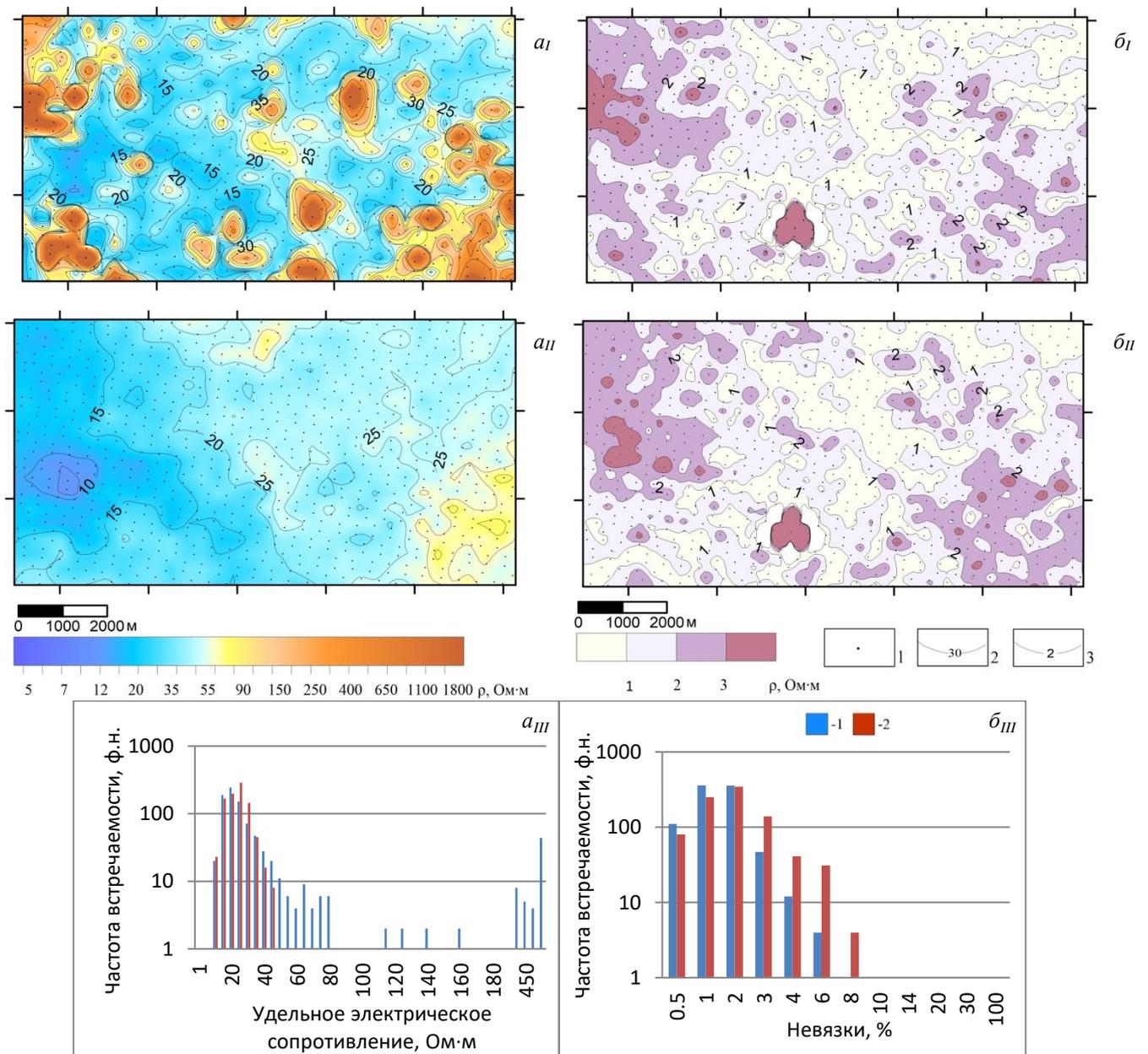


Рис. 3 – Результат поточечной инверсии и инверсии с применением пространственной невязки: a_I , a_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок поточечной инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне; a_{III} – сравнение распределений удельного электрического сопротивления при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой; b_I , b_{II} – карты удельного электрического сопротивления и невязок инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки; b_{III} – сравнение распределений невязок при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой: 1 – пункты зондирования становлением поля в ближней зоне; 2 – изолинии сопротивления по данным зондирования становлением поля в ближней зоне, Ом-м; 3 – изолинии результирующей невязки по данным зондирования становлением поля в ближней зоне, %.

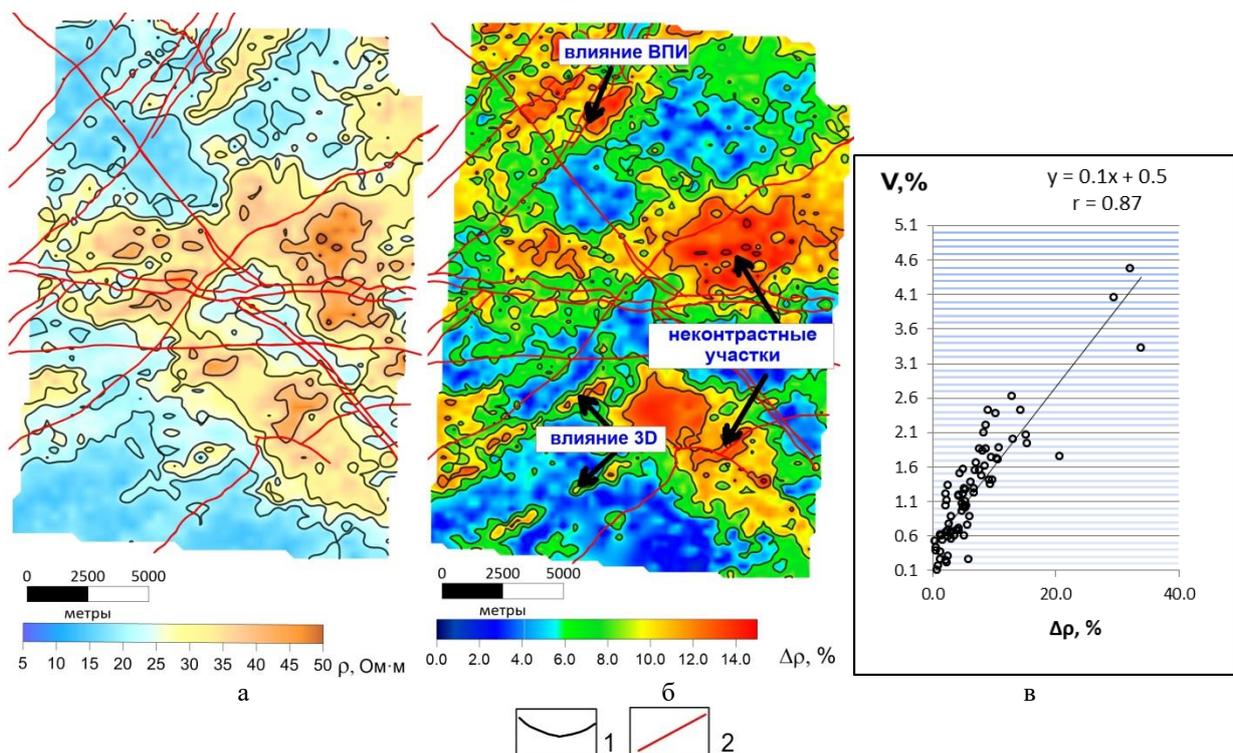


Рис. 4 – Результат решения обратной задачи в интервале нижнемоотской подсвиты: а – карта продольного сопротивления; б – карта ошибки определения продольного сопротивления; в – уравнение регрессии и диаграмма связи коэффициента вариации и ошибки удельного электрического сопротивления: 1 – изолинии продольного сопротивления; 2 – линии разломов, определенные методом сейсморазведки общей глубинной точки

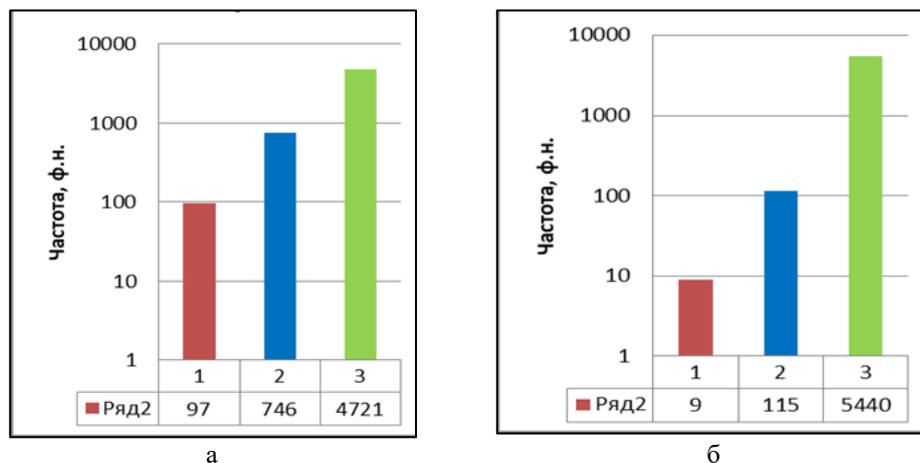


Рис. 5 – Результат оценки качества инверсии InQ : а – гистограмма критерия качества инверсии InQ для поточечной инверсии; б – гистограмма критерия качества инверсии InQ для подхода пространственного накопления

Таблица

Средние значения качества по основным критериям

Показатель	Подход 1	Подход 2
Невязка $\delta, \%$	0.96	0.97
Латеральная выдержанность L	0.97	0.99
Качество инверсии InQ	0.96	0.98

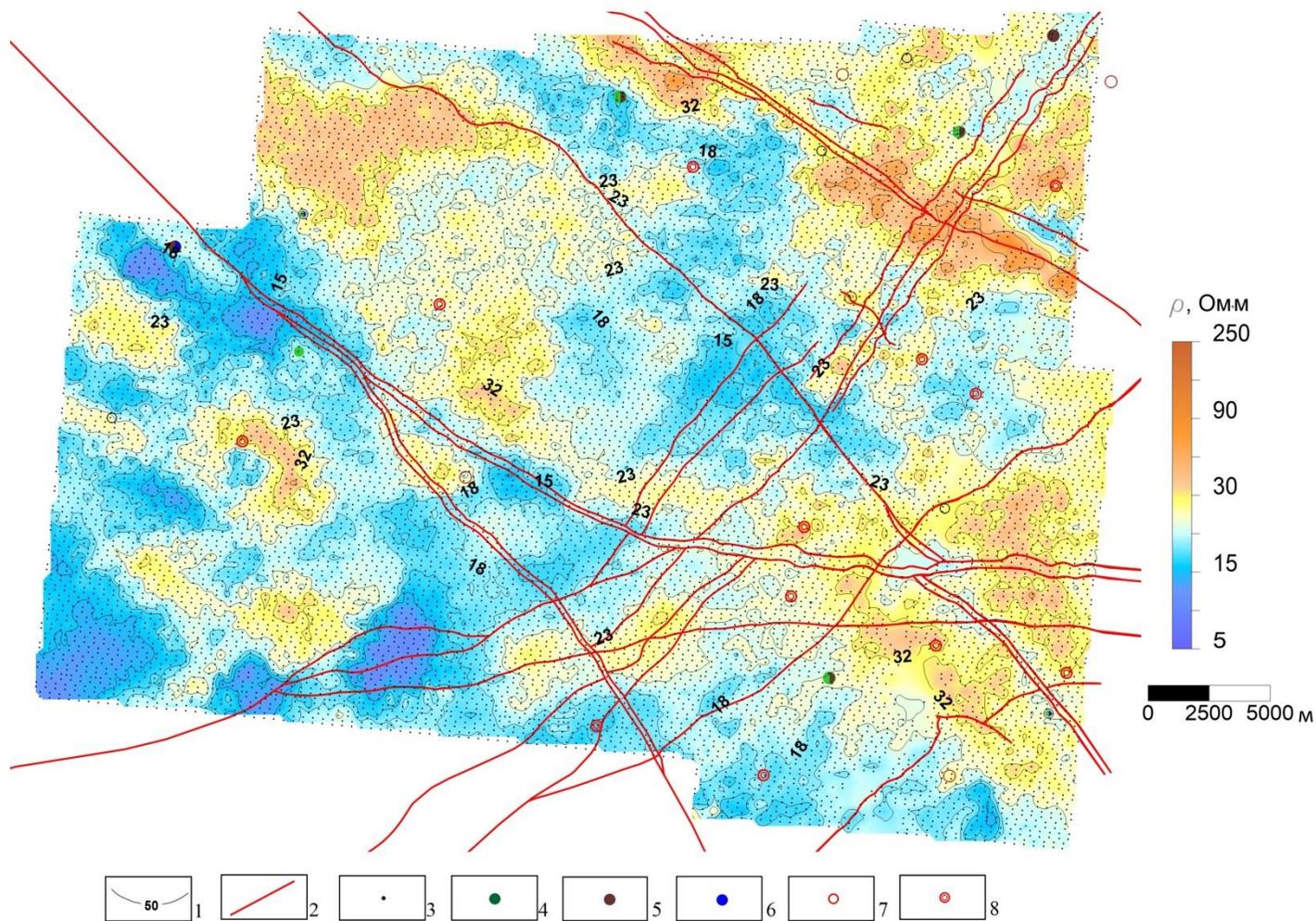


Рис. 6 – Карта удельного электрического сопротивления терригенных отложений по результатам интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне: 1 – изолинии сопротивления по данным зондирования становлением поля в ближней зоне, Ом·м; 2 – разломы по результатам площадной сейсморазведочной съемки методом общей глубинной точки; 3 – пункты зондирования становлением поля в ближней зоне; 4–7 – скважины глубокого бурения прогнозные и пробуренные с указанием насыщения: 4 – газ, 5 – нефть, 6 – вода, 7 – сухо; 8 – проектные скважины

часто также проводится комплексная интерпретация данных МОГТ и ЗСБ путем закрепления структурного каркаса по данным сейсморазведки МОГТ, а далее – вариация геоэлектрических параметров. Данный подход показал высокую эффективность при решении нефтегазопоисковых задач [Агафонов и др., 2004; Буддо и др., 2018, 2021; Семинский, 2017; Поспеев и др., 2018a; Кубышта и др., 2014; Oshmarin et al, 2016; Токарева и др., 2017]. Необходимо не только иметь полное представление о геологическом строении изучаемой среды и целевых интервалов, но и уделять внимание особенностям проявления эквивалентности решения при увеличении количества изучаемых горизонтов, а также проявлению влияния эффектов магнитной вязкости [Захаркин и др., 1988; Gubbins, Herrero-Bervera, 2007; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Кожевников, Антонов, 2009; Кожевников, 2008, 2012; Шарлов и др., 2021] и частотной дисперсии сопротивления – индукционно-вызванной поляризации пород [Антонов, Шеин, 2008; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019; Поспеев и др., 2018b]. Важно также понимать возможности выделения целевых интервалов и чувствительность метода к их изучению. Большое значение при аппроксимации реальных моделей сред детальными моделями играет чувствительность метода ЗСБ, которая определяется контрастностью целевых горизонтов.

Инверсия каждой кривой ЗСБ путем применения стандартных алгоритмов оптимизации обратной задачи [Тихонов, 1986]. При производстве работ по площадной сети наблюдений и повышении детальности получаемых разрезов поточечная инверсия приводит либо к появлению ложной дифференцированности геоэлектрических параметров по латерали, либо к ухудшению качества подбора. Возникает необходимость автоматизации процесса инверсии и унификации существующих алгоритмов, а также адаптации их под поставленные нефтегазопоисковые задачи на территории Восточной Сибири.

Типичная геоэлектрическая модель осадочного чехла юга Сибирской платформы

Типичная геоэлектрическая модель состоит из 8–15 горизонтов, границы которых, за исключением верхних, обычно закрепляются по данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018].

В разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы выделяются надсолевой, солевой и подсолевой комплексы, ниже которых расположен кристаллический фундамент. Первый комплекс включает отложения среднего-верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также ордовика, перми, карбона, триаса, юры и четвертичные отложения. Мощность отложений составляет до 500 м. Комплекс характеризуется УЭС в диапазоне от 30 до 2000 Ом·м и подразделяется на несколько геоэлектрических горизонтов.

Солевой комплекс представлен галогенно-карбонатными породами среднего и нижнего кембрия. Он включает отложения литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит. Его суммарная мощность изменяется от 750 до 1300 м, УЭС изменяется в пределах от 45 до 500 Ом·м. По данным ЗСБ комплекс разделяется на 4–6 геоэлектрических горизонтов.

Отложения подсолевого комплекса стратиграфически соотносятся с карбонатными, сульфатно-карбонатными и терригенными отложениями венда-нижнего кембрия. Они включают: нижнюю часть усольской свиты – осинский горизонт, отложения тирской, собинской, катангской, тэтэрской и непской свит. Мощность комплекса составляет 250–400 м, УЭС – от 20 до 150 Ом·м. В пределах интервала выделяется до 6 горизонтов-коллекторов, что понижает продольное сопротивление комплекса. По данным геофизических исследований скважин и геологической стратификации подсолевой комплекс дифференцируется на 3 геоэлектрических горизонта с различным УЭС.

Подход латеральной закрепленной одномерной инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопоисковых задач

Для изучения пространственно-временных характеристик электромагнитных полей и результата решения обратной задачи проведено моделирование сигналов становления. Рас-

четыре синтетических кривых ЗСБ проводились от типичной геоэлектрической модели для установок, применяемых в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы. Для оценки латеральной разрешающей способности 1D-инверсии проводились математические расчеты с использованием программы 3D-инверсии GEO-EM, разработанной М.Г. Персовой [Персова, 2011]. Инверсия синтетических кривых ЗСБ проводилась с помощью модуля автоматической одномерной инверсии Model 3 [Агафонов, Поспеев, Сузов, 2006].

В результате 1D-инверсии синтетических кривых определено, что УЭС целевого горизонта восстанавливается с минимальной ошибкой. Коэффициенты весового фильтра получаются дифференцированием графика значений УЭС слоя, восстановленного путем 1D-инверсии. Ширина полученного в результате расчета фильтра пропорциональна эффективному радиусу влияния токопроводящего объекта и равна удвоенной глубине расположения целевого горизонта. Середина фильтра соответствует границе смены сред, а его коэффициенты аппроксимируются гауссовой функцией.

При площадной инверсии данных размерность уравнения увеличивается и фильтр становится двумерным и осесимметричным. При подборе модифицируется общее значение УЭС слоя для всех кривых ЗСБ, входящих в радиус исследований. Функционал невязки рассчитывается при этом с использованием весовой функции $W(R)$:

$$W(R) = K_f = e^{-\frac{x^2}{R^2}}, \quad (2)$$

где R – эффективный радиус влияния неоднородности, м; x – расстояние между пунктами наблюдений.

Общая формула функционала выглядит следующим образом:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}, \quad (3)$$

где δ_i – невязка между теоретической и практической кривыми i -й точки; n – количество точек в радиусе влияния неоднородности.

На основании математического моделирования предложена методика, отличающаяся от обычной «поточечной» одномерной инверсии. При интерпретации данных ЗСБ, направленных на решение нефтегазопроисловых задач, изначально по данным МОГТ формируется упрощенный структурный каркас, который выступает в качестве стабилизирующего параметра. В качестве параметра регуляризации выступает типичная геоэлектрическая модель по данным априорной информации либо набор моделей [Матвеев, 1990]. Затем проводится инверсия кривых ЗСБ, в случае влияния индукционно-вызванной поляризации [Антонов, Кожевников, 2013; Компаниец и др., 2019] или магнитной вязкости [Шарлов и др., 2021] производится их учет. После инверсии в рамках упрощенной модели происходит детализация структурного каркаса в подсолевой части разреза по данным площадной сейсморазведки 3D МОГТ и данным бурения скважин. Автором предлагается проведение инверсии с применением пространственного накопления или учета соседних точек ЗСБ в процессе инверсии. В случае применения подхода регуляризации к функции невязки добавляется стабилизирующий функционал в качестве весовой функции (2) [Мурзина, 2016; 2022]. При этом УЭС каждого слоя в каждой точке зондирования рассчитывается как средневзвешенное в рамках эффективного радиуса значение.

Применительно к геологическим условиям юга Сибирской платформы наиболее важными результатами математического моделирования является следующее:

- проведена оценка влияния латеральных пространственных параметров токопроводящего горизонтально залегающего слоя, и выявлены отличия результатов одномерной инверсии данных ЗСБ относительно истинных параметров целевого горизонта;

– представлен подход расчета пространственного фильтра, который описывается квазигауссовой функцией и применяется при инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований для регуляризации обратной задачи ЗСБ.

Глава 2. Подход к оценке качества инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне

В роли основного показателя качества инверсии выступает среднеквадратическое расхождение практической и теоретической кривых – невязка. Тем не менее невязка не дает полного представления о качестве решения обратной задачи в силу эквивалентности геоэлектрических параметров при работе с многослойными моделями. Важным критерием, позволяющим проанализировать полученный результат решения обратной задачи, может выступать выдержанность разреза по латерали и соответствие априорной информации физико-геологической модели. Система оценки качества данных зондирований становлением поля в ближней зоне (рис. 1) включает в себя блок оценки качества полевого материала (EMQC) и оценки качества инверсии (EMInQ). Для контроля за результатом интерпретации предложенная система оценки качества инверсии (*англ.*: EMInQ – electromagnetic inversion quality) данных ЗСБ [Мурзина и др., 2017] встроена в программный комплекс Model 4 [Емельянов и др., 2016].

Оценка качества полевого материала

При массовой интерпретации площадных данных полезен учет других критериев, характеризующих качество полевого материала [Гусейнов, 2015]: случайной погрешности измерений или инструментальной ошибки (расхождение кривых ЗСБ в поздней стадии становления в пределах установки). Комплексная оценка результата решения обратной задачи и качества полевого материала позволяет провести комплексный анализ и выявить причину искажения результата инверсии данных ЗСБ.

Оценка качества инверсии

Предложены основные критерии, позволяющие оценить качество инверсии [Мурзина, 2017]:

- 1) Оценка расхождения теоретической и практической кривых – невязка.
- 2) Определение выдержанности горизонтально-слоистого разреза.

В качестве дополнительной оценки автором предложено определение латеральной выдержанности геоэлектрических параметров в разрезе по латерали. Расчет отклонения УЭС слоя от среднего по выборке в пределах эффективного радиуса исследований L можно рассчитать по следующей формуле:

$$L = \ln \rho_L - \frac{\sum \ln \rho_i \cdot g_i}{\sum g_i}, \quad (4)$$

где L – отклонения УЭС слоя от среднего по выборке в пределах эффективного радиуса исследований R ; ρ_L – УЭС оцениваемого слоя; ρ_i – УЭС оцениваемого слоя в каждой точке; $\frac{\sum \ln \rho_i \cdot g_i}{\sum g_i}$ – средневзвешенное значение отклонения, определенное в зависимости от расстояния до точки, вес которой определяется заданием степенной функции в соответствии с формулой (2).

Определение соответствия геоэлектрической модели априорной информации базируется на анализе соотношения УЭС в слоях типичной геоэлектрической модели (по результатам бурения скважин) и модели УЭС по данным ЗСБ.

Комплексный критерий качества инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне

Предлагаемый подход комплексной оценки автоматической 1D-инверсии применительно к квазиодномерным моделям основан на определении функции $f(\delta, L)$, в которой δ – невязка; L – латеральная выдержанность разреза или соответствие модели априорной информации [Мурзина и др., 2017].

Комплексный коэффициент качества инверсии InQ (от англ.: inversion quality) рассчитывается следующим образом:

$$InQ(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq 2 \\ 0.95, & 2 < \delta < 5 \\ 0.9, & 5 < \delta < 10 \\ 0.8, & \delta > 10 \% \end{cases} \quad (5)$$

$$InQ(L) = \begin{cases} 1, & 0.95, L \leq 0.5 \\ 0.9, & L \leq 1 \\ 0.8, & 1 < L < 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$InQ = \begin{cases} \min(InQ(\delta), InQ(L)), & K_I = 1 \\ 0, & K_I = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Здесь K_I – коэффициент целостности данных, который принимает значение 0 или 1; δ – невязка; L – латеральная выдержанность моделей в разрезе.

Подход к оценке ошибки определения удельного электрического сопротивления статистическими методами

Для анализа применимости коэффициента вариации V , %, определяемого посредством инверсии методом Монте-Карло с элементами «имитации отжига» [Лопатин, 2005], в качестве инструмента оценки ошибки УЭС слоя проведено предварительное моделирование. Расчеты проводились при помощи программного средства Model 4 [Емельянов, 2016], встроенного в программный комплекс SGS-ТЕМ [Шарлов, 2010].

При применении метода Монте-Карло с элементами «имитации отжига» для инверсии данных ЗСБ на каждом последующем шаге решения обратной задачи происходит понижение «температуры» по невязке и сужение окна анализируемой выборки значений УЭС в каждом слое. При уменьшении среднеквадратического отклонения во время инверсии и достаточном количестве шагов спуска последняя итерация описывает ошибку определения УЭС [Жданов, 2005; Мурзина, 2018]. Поэтому оценка ошибки определения УЭС базируется на анализе последней итерации цикла инверсии. Для проведения более независимой от размерности величины УЭС оценки полученное в результате решения обратной задачи среднеквадратическое отклонение для выборки УЭС слоя нормируется на среднее значение УЭС слоя. Данная величина обозначается как коэффициент вариации V и в дальнейшем используется для проведения оценок.

На основе генерализованной геоэлектрической модели юга Сибирской платформы проведено моделирование сигналов становления установок (Qq , $Q-q$) с разносомами 0, 0.5, 1 км. Между определенным в результате инверсии коэффициентом вариации V и ошибкой восстановления УЭС $\Delta\rho$, полученной от истинной модели, коэффициент корреляции составляет 0.9. Таким образом, оценив коэффициент вариации V при инверсии методом Монте-Карло с элементами «имитации отжига», мы можем определить ошибку инверсии $\Delta\rho$.

Для перехода от коэффициента вариации V к ошибке определения УЭС $\Delta\rho$ предлагается следующая последовательность (рис. 2):

- определение типичной геоэлектрической модели;
- расчет синтетических сигналов и инверсия с накоплением статистики методом Монте-Карло с элементами «имитации отжига»;
- расчет ошибки определения УЭС, полученных при инверсии и заданных в стартовой модели;
- выгрузка среднеквадратического отклонения для каждой модели и определение коэффициента вариации V ;
- расчет зависимости $V/\Delta\rho$.

Для расчета ошибки определения УЭС на основе практических данных проводится инверсия с накоплением статистики от типичной геоэлектрической модели месторождения,

затем после определения ошибки УЭС производится переход от коэффициента вариации к ошибке определения УЭС на основе практических данных.

Глава 3. Инверсия данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом пространственной невязки на примере геологического разреза Непско-Ботуобинской антеклизы

В главе представлены результаты интерпретации материалов 3D ЗСБ, полученных на территории юга Непско-Ботуобинской антеклизы с применением пространственного фильтра при инверсии данных электромагнитных зондирований. Показаны подходы оценки качества данных ЗСБ, приведен пример выбора оптимального результата интерпретации на основе представленных оценок.

Пример инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом пространственной невязки и подходов к оценке результата инверсии на Непском своде

В разрезе осадочного чехла в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы довольно отчетливо выделяется три структурно-литологических комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой. Участок работ находится в восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы [Конторович, 1975], в пределах Непского свода.

Объектом исследований, перспективным в нефтегазоносном отношении, являются отложения подсолевого комплекса. В ходе интерпретации подсолевой комплекс был разделен на три подгоризонта – перспективными являются верхний (карбонатный) и нижний (преимущественно терригенного состава). Целевым объектом в данной работе стал нижний горизонт, объединяющий преображенский пласт, терригенные породы чорской свиты (включающей в себя терригенные пласты ВЧ₁ и ВЧ₂ (В₁₀ и В₁₃)) и кору выветривания.

Результаты инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом пространственной невязки

Сравнивается результат применения поточечной инверсии (рис. 3а₁, б₁) и инверсии с применением пространственного накопления (рис. 3а_{II}, б_{II}). В первом и во втором случае отмечено, что полученные в ходе решения обратной задачи невязки близки (см. рис. 3б₁, б_{II}) и в большей степени связаны с качеством полевого материала (где невязка более 2 %). Чрезмерная детализация разреза приводит к повышению эквивалентности между смежными слоями, ввиду чего в рамках схожих значений невязок могут быть построены абсолютно разные модели УЭС (см. рис. 3а₁, а_{II}). Так, на карте УЭС, полученной в результате применения поточечной инверсии (см. рис. 3а₁), отмечено большое количество «выбросов», которые связаны с качеством полевого материала (присутствие локальных «выбросов» в местах осложнения кривых ЗСБ).

Вследствие применения разработанной методики осложняющие интерпретацию эффекты полностью устраняются (см. рис. 3а_{II}). Прослеживается зональность геоэлектрических аномалий по площади. Единый подход к инверсии данных значительно снижает вероятность возникновения локальных «выбросов», которые наблюдаются при поточечной инверсии, позволяя уменьшить влияние дисперсии на поздних временах кривых ЗСБ на результат интерпретации [Murzina et.al., 2020; Мурзина и др., 2022б].

Наглядно оценить и сравнить полученный результат позволяют диаграммы распределений УЭС и невязок (рис. 3а_{III}, б_{III}). В первом случае в результате решения обратной задачи получены невязки ниже, чем во втором. Это объясняется тем, что не всегда невязка является показателем качества решения обратной задачи и в некоторых случаях чрезмерный подбор кривых ЗСБ приводит к учету случайных полевых погрешностей кривых, не несущих в себе информации. Распределение УЭС, полученное в результате выполнения инверсии с применением пространственного фильтра (см. рис. 3а_{III}, б_{III}), становится более устойчивым и стремится к логнормальному закону распределения. В первом случае решение обратной задачи менее устойчиво [Murzina et.al., 2020; Мурзина и др., 2022б].

Интерпретация с применением разработанной методики совместной инверсии соседних зондирований позволяет получить уверенный результат, который в дальнейшем может использоваться для составления прогнозных карт. Показано, что использование пространственного фильтра при инверсии кривых ЗСБ в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей повышает устойчивость решения обратной задачи.

Оценка ошибки определения удельного электрического сопротивления методом Монте-Карло

При пересчете через уравнение регрессии коэффициента вариации и ошибки УЭС выделяется несколько эквивалентных участков [Мурзина, 2018], таких как:

- области с неконтрастными геоэлектрическими свойствами (рис. 4а);
- области с влиянием частотной дисперсии удельного сопротивления (рис. 4б);
- участки трехмерных неоднородностей (вдоль разломных зон);
- зоны больших значений невязки.

Показано, что при определении УЭС слоя статистическими методами инверсии коэффициент вариации исследуемого параметра является мерой количественной оценки качества. Также проиллюстрировано, что коэффициент вариации, отражает ошибку определения геоэлектрических параметров слоя, которая зависит от контрастности изучаемого параметра и качества полевого материала.

Оценка качества инверсии

Для оценки качества использовались невязка и латеральная выдержанность.

Невязка δ . Оценка невязки проводилась для временного диапазона от 0.2 до 500 мс. Данный диапазон пригоден для совместного анализа кривых, полученных на соосных и разнесенных приемниках. Решения с невязками менее 2 % относятся к хорошему качеству. Согласно инструкции по электроразведке расхождения между наблюдаемыми сигналами ЗСБ при проведении контрольных наблюдений не должны превышать 5 %.

Латеральная выдержанность L . В качестве оценок отклонения применяется средне-взвешенное в радиусе среднеквадратическое отклонение. Считается, что в случае идеального решения обратной задачи отклонение $\sigma \leq 1$, $\sigma \leq 1.5$ – хорошее качество решения обратной задачи, $\sigma \geq 2$ – задача не решена.

В результате применения методики оценки качества инверсии показано, что второй вариант является более оптимальным по критерию InQ (рис. 5). Большая часть точек отнесена к хорошему качеству инверсии. Среднее значение показателя InQ выше во втором случае (0.98), нежели в первом (0.96) (таблица, см. рис. 5). Таким образом, путем выбора наилучших невязок и оптимальной выдержанности параметра УЭС в слоях второй вариант инверсии определен как наиболее оптимальный.

Результат применения методики

В соответствии с представленной методикой пространственного накопления в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей сред выполнена интерпретация данных ЗСБ на нескольких нефтегазовых месторождениях в пределах Непского свода. Общий объем физических наблюдений составляет более 30000 ф. н. В результате получены согласованные карты УЭС по данным ЗСБ за период работ 2012–2015 гг. (рис. 6). Распределение геоэлектрических характеристик подсолевого комплекса в целом является однородным, и лишь в отдельных зонах оно осложнено влиянием тектонических и литологических факторов. По итоговым картам УЭС терригенных отложений давался прогноз на заложение скважин. Достоверность прогноза по данным ЗСБ составила в среднем 80 %.

Оценка качества инверсии электромагнитных зондирований на примере площадей юга Сибирской платформы

Для данных ЗСБ, выполненных на территории Сибирской платформы, была проведена оценка качества инверсии. Оценка невязки проводилась с настройками, определенными ранее (см. подраздел «Оценка качества инверсии», с. 14). В среднем для участков, расположенных на территории Непско-Ботубинской антеклизы, коэффициент качества инверсии

InQ составляет 0.95. Понижение качества инверсии закономерно происходит на территории Катангской седловины и Байкитской антеклизы, где на поверхности присутствуют туфовые или вулканические магнитовязкие образования, искажающие кривые ЗСБ и осложняющие их интерпретацию (коэффициент качества инверсии InQ составляет 0.9).

Показано, что предложенный подход позволяет экспрессно проанализировать результат инверсии данных ЗСБ и дать количественную оценку результата инверсии кривых ЗСБ.

Выводы

Применительно к геологическим условиям юга Сибирской платформы в качестве наиболее важных выводов можно отметить следующие:

- применение пространственного фильтра при инверсии кривых ЗСБ в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей повышает устойчивость решения обратной задачи;
- коэффициент вариации, получаемый в процессе инверсии данных ЗСБ статистическими методами, отражает ошибку определения УЭС слоя, которая зависит от контрастности изучаемого параметра и качества полевого материала;
- комплексный критерий качества инверсии, использующий предложенные в работе количественные критерии, такие как невязка и латеральная выдержанность, является удобным инструментом оперативной оценки надежности результатов инверсии.

Заключение

Основные результаты проведенных исследований по теме диссертации представляют новый подход к инверсии данных площадных электромагнитных зондирований и демонстрируют его эффективность на примере эталонных нефтегазовых месторождений Восточной Сибири.

Предложен способ оценки ошибки определения УЭС при изучении квазиодномерного разреза осадочного чехла средствами инверсии методом Монте-Карло с элементами «имитации отжига». Показано, что применение данного стохастического алгоритма позволяет применять коэффициент вариации, рассчитываемый в результате накопления статистики в процессе инверсии данных ЗСБ, в качестве инструмента оценки ошибки УЭС.

Предложенный подход к оценке результата инверсии позволяет экспрессно оценивать результат решения обратной задачи для больших массивов данных (порядка 1000 ф. т. и более). Применение разработанной методики оценки качества инверсии позволяет ранжировать результат интерпретации по уровню надежности.

Результаты исследования рекомендуются для практического применения в производственных и научных организациях, осуществляющих деятельность в сфере интерпретации и супервайзерского контроля качества инверсии данных ЗСБ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах перечня ВАК:

1. Поспеев А.В., **Мурзина Е.В.**, Компаниец С.В., Емельянов В.С. Возможности электромагнитных установок при изучении полей вызванной поляризации // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018б. Т. 41. № 2. С. 80–90. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-2-80-90>.
2. Семинский И.К., Буддо И.В., **Мурзина Е.В.**, Селяев В.А. Возможности электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопроисковых задач на юге Сибирской платформы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 3. С. 84–92. <https://doi.org/10.17308/geology.2019.3/1816>.
3. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., **Мурзина Е.В.**, Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисковых исследованиях на юге Сибирской платформы // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2019. Т. 42. № 2. С. 151–165. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164>.
4. **Мурзина Е.В.**, Поспеев А.В., Буддо И.В., Шарлов М.В., Семинский И.К., Мисюркеева Н.В. [и др.]. Возможности малоглубинных нестационарных электромагнитных зондирований для выделения газогидратных скоплений в криолитозоне северных регионов Западной Сибири // Криосфера Земли. 2022а. Т. 26. № 2. С. 51–62. <https://doi.org/10.15372/KZ20220204>.
5. **Мурзина Е.В.**, Поспеев А.В., Семинский И.К., Буддо И.В., Немцева Д.Б., Емельянов В.С., Агафонов Ю.А. Особенности инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований при нефтегазопроисковых исследованиях на территории Непско-Ботуобинской антеклизы // Науки о Земле и недропользование. 2022б. Т. 45. № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-2-137-151>.

Подписано в печать 29.07.2022г. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать Riso.
Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 160 экз. Заказ 284.
Отпечатано в Институте земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.