

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

Мурзина Екатерина Викторовна

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

Специальность 25.00.10 – геофизика, геофизические методы  
поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
доктор геолого-минералогических наук, профессор  
А.В. Поспеев

Иркутск, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
ГЛАВА 1. ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПРИ РЕШЕНИИ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ .....	13
1.1. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне, методические особенности регистрации и обработки и интерпретации сигналов зондирования становлением поля в ближней зоне .....	13
1.1.1. История развития процесса интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне .....	17
1.1.2. Понятие некорректно поставленных задач и способы их решения .....	20
1.1.3. Методы оптимизации, применяемые при инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне .....	22
1.2. Подход латеральной закрепленной одномерной инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопроисковых задач .....	24
1.2.1. Существующие подходы латеральной ограниченной инверсии в анизотропных и квазигоризонтально-слоистых средах .....	25
1.2.2. Классификация сетей наблюдений .....	27
1.2.3. Формирование структурного каркаса и оценка чувствительности к изучению целевых интервалов .....	28
1.2.4. Типичная геоэлектрическая модель осадочного чехла юга Сибирской платформы .....	31
1.2.5. Стандартная методика инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне .....	32
1.2.6. Адаптация подхода пространственного накопления к инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне .....	34
1.2.7. Обоснование функции пространственной невязки .....	36
1.2.8. Формирование параметрического функционала для инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей сред .....	39
1.2.9. Апробация пространственного фильтра на синтетической модели .....	40

1.2.10. Сравнение поточечной автоматической инверсии и инверсии с применением пространственного фильтра на практических данных для нижнего подгоризонта, объединяющего преобразенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания .....	42
1.3. Выводы.....	44
<b>ГЛАВА 2. ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ.....</b>	<b>45</b>
2.1. Структура системы оценки качества инверсии данных ЗСБ .....	45
2.2. Оценка качества полевого материала EMQC .....	46
2.3. Оценка качества инверсии EMinQ.....	48
2.3.1. Методика оценки погрешности решения обратной задачи.....	48
2.3.2. Методика расчета критерия латеральной выдержанности или контроль качества получаемой модели .....	49
2.3.3. Комплексный критерий качества инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне .....	51
2.3.4. Подход к комплексной оценке качества инверсии и качества полевого материала данных площадного зондирования становлением поля в ближней зоне....	51
2.4. Подход к оценке ошибки определения удельного электрического сопротивления статистическими методами.....	52
2.4.1. О методе Монте-Карло .....	53
2.4.2. Методика оценки ошибки определения удельного электрического сопротивления .....	55
2.4.3. Обоснование подхода к расчету ошибки удельного электрического сопротивления при инверсии .....	57
2.4.4. Подход к оценке чувствительности метода ЗСБ при изучении детальных моделей сред путем синтетического моделирования .....	59
2.5. Выводы.....	62
<b>ГЛАВА 3. ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕВЯЗКИ НА ПРИМЕРЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ .....</b>	<b>63</b>
3.1. Геолого-тектоническое строение объектов исследований.....	63

3.2. Оценка качества инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований на примере геологического разреза Непского свода (участок 1) .....	65
3.2.1. Объект исследований и физико-геологическая модель.....	65
3.2.2. Методика работ зондирования становлением поля в ближней зоне .....	67
3.2.3. Оценка ошибки определения удельного электрического сопротивления .....	67
3.2.4. Выбор итогового результата при помощи системы оценки качества инверсии EMinQ .....	71
3.2.5. Пример комплексной оценки качества инверсии и качества полевого материала данных площадного зондирования становлением поля в ближней зоне .....	75
3.2.6. Результат применения методики.....	76
3.3. Оценка качества инверсии данных площадных зондирований, полученных на юге Непско-Ботубинской антеклизы (участок 2).....	79
3.3.1. Физико-геологическая модель месторождения и объект исследований .....	79
3.3.2. Характеристика литологического строения осинского горизонта.....	82
3.3.3. Методика работ зондирования становлением поля в ближней зоне .....	87
3.3.4. Инверсия данных зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки .....	88
3.3.5. Применение системы оценки качества и выбор результата инверсии .....	89
3.3.6. Результат инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне и соотношение удельного электрического сопротивления с литологическим составом и строением рифовой постройки .....	91
3.4. Оценка качества инверсии электромагнитных зондирований на примере Сибирской платформы .....	95
3.5 Выводы.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Эффективность поисков и разведки месторождений нефти и газа юга Сибирской платформы обеспечивается применением прогрессивных геофизических технологий. За последние десятилетия технологии электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) активно развиваются. 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 получить объективный результат, соответствующий априорной информации. Кроме того, важным фактором является объективная оценка качества инверсии.

Оптимальность интерпретации, полученной с помощью инверсии, определяется посредством ошибки подбора. Достигаемое в ходе инверсии расхождение между практической и теоретической кривыми ЗСБ, называется невязкой [Матвеев, 1990; Oldenburg, 2005; Могилатов, 2002, 2007; Жданов, 2017]. Сложность решения обратной задачи обеспечивается большой размерностью пространства параметров. Неединственность решения обратной задачи геофизики [Светов, 1973; Жданов, 2012] требует использования способов регуляризации решения [Тихонов, Арсенин, 1986] и их оценки. Подходы, основанные на регуляризации обратной задачи в соответствии с априорной информацией не всегда применимы на практике. Во-первых, не всегда имеется достаточное количество априорной информации. Во-вторых, не всегда понятно, в какой мере можно «распространять» типичную геоэлектрическую модель среды, полученную в одной точке исследуемой среды на основании данных бурения скважин. Становится актуальным построение более унифицированных алгоритмов регуляризации, адаптированных под поставленные нефтегазопроисковые задачи, чему посвящена первая глава диссертации.

Кроме того, важным аспектом является объективная оценка результата инверсии. При решении нефтегазопроисковых задач часто возникает вопрос о надежности выданного прогноза, 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.

Третья глава содержит в себе несколько примеров применения предложенных подходов на реальных данных, зарегистрированных на территории НБА.

## Степень изученности 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 и 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]. Оптимальность интерпретации, полученной с помощью инверсии, определяется посредством ошибки подбора или поиска целевой функции, которая и является критерием качества [Тихонов, Костомаров, 1984].

Автоматизация инверсии данных нестационарных зондирований требует использования эффективных алгоритмов регуляризации. При решении нефтегазопроисловых задач снижение эквивалентности решения достигается использованием структурного каркаса среды по данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018a; 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 или пространственного фильтра. Оптимизируемый 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 и теоретическая значимость**

Применительно к типичному разрезу Сибирской платформы впервые предложена и опробована методика инверсии данных площадных электромагнитных зондирований, направленных на решение нефтегазопоисковых задач. Предложен подход расчета невязки путем задания весовой функции в соответствии с эффективным радиусом токового кольца. В сравнении с традиционным подходом к интерпретации данных ЗСБ разработана ме-

тодика автоматической инверсии, применение которой основано на пространственном накоплении статистики УЭС в каждом слое в процессе инверсии. Оценена возможность 1D-инверсии данных ЗСБ при решении нефтегазописковых задач при применении регулярной сети наблюдений. Рассчитана форма фильтра, применение которого при инверсии позволяет дополнительно к имеющейся априорной информации получать устойчивую геоэлектрическую модель среды.

В результате инверсии методом Монте-Карло с элементами «имитации» отжига данных ЗСБ предложена методика оценки ошибки определения УЭС, отражающая эквивалентность решений при инверсии каждой кривой зондирования, ошибки инверсии, аппаратные ошибки и внешние помехи. Предложено оценивать стабильность решения обратной задачи для каждой конкретной кривой зондирования путем оценки статистических параметров (среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации), получаемых в результате решения обратной задачи. Путем проведения синтетического моделирования автором получены численные зависимости коэффициента вариации и ошибки восстановления УЭС при инверсии кривых ЗСБ. На основании полученных зависимостей показан способ оценки ошибки УЭС при изучении коллекторских свойств перспективных горизонтов.

Предложен подход, направленный на оценку результата автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований, основанный на комбинировании погрешности решения обратной задачи и латеральной выдержанности разреза. Автором выполнена численная имитация кривых ЗСБ путем применения аппарата 3D-инверсии, на основании которой показана невозможность существования единичных локальных аномалий при изучении квазигоризонтально-слоистых сред с помощью 1D-инверсии данных ЗСБ. На основании проведенного моделирования предложено определение «латеральной выдержанности» моделей в разрезе. Разработана методика комплексной оценки качества инверсии сигналов становления, которая в совокупности с результатом оценки полевого материала дает полное представление о причине возникновения ошибки в процессе решения обратной задачи.

### **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**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.10 в следующих аспектах:

1. исследование природы, свойств и геодинамической интерпретация 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.
2. 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;
3. 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;
4. компьютерные системы обработки и интерпретации геолого-геофизических данных;
5. контроль разработки месторождений полезных ископаемых по данным наземных и скважинных геофизических исследований.

### **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 пло-

щадных 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.

### **Фактический материал**

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 EMQC [Гусейнов, 2015].

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 электроразведочных работ методом ЗСБ (более 15000 ф. н.), выполненных с применением цифрового телеметрического программно-аппаратного комплекса электроразведочной станции SGS-TEM по высокоплотным регулярным сетям наблюдений на нескольких лицензионных участках Восточной Сибири.

## **Методы исследований**

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 «Иновации 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 из 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.

## **ГЛАВА 1. ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПРИ РЕШЕНИИ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

В связи с развитием нефтегазопроисковых исследований в сложных геологических условиях Восточной Сибири возрастает потребность повышения эффективности поисковых и разведочных работ. Нестационарные электромагнитные зондирования благодаря высокой чувствительности к вариациям проводящих горизонтов разреза заняли достойное место в комплексе работ по изучению строения осадочного чехла наряду с сейсморазведкой и другими методами структурной геофизики. Исследуемые площади насчитывают десятки тысяч физических наблюдений, в последние годы растет объем работ, выполняемых методом ЗСБ 3D, как правило, совмещенных с МОГТ 3D.

Особое значение электроразведка имеет при изучении горизонтов-коллекторов, поскольку структурный фактор, хорошо изучаемый полевой сейсморазведкой, играет незначительную роль в локализации ресурсов углеводородов. Практика проведения исследований в Восточной Сибири за последние два-три десятилетия наглядно демонстрирует массу примеров успешного решения непростых геологических задач при использовании комплекса методов наземной геофизики, скважинных и петрофизических исследований [Поспеев и др., 2010, 2011, 2018a; Буддо, 2012 и Buddo et al., 2012; Буддо и др., 2018; Мурзина и др., 2022]. В связи с этим крайне актуальной является проблема совершенствования информационно-компьютерных технологий комплексного изучения недр для углубленного извлечения максимального объема полезной информации и контроля качества получаемой в процессе количественной интерпретации информации.

### **1.1. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне, методические особенности регистрации и обработки и интерпретации сигналов зондирования становлением поля в ближней зоне**

ЗСБ – метод с импульсным контролируемым источником, основанный на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике [Kaufman, 1978; Светов, 1973; Жданов, 1986; McNeill, 1980; Ваньян, 1965; Кауфман, Морозова, 1970; Матвеев, 1990; Могилатов, 2002; Рабинович, 1976,1987]. Существует множество модификаций метода зондирования становлением поля, отличающихся способами возбуждения поля и набором регистрируемых компонент. Наибольшее распространение получили модификации, использующие индукционное возбуждение и регистрацию переходной ЭДС, с наземными незаземленными электромагнитными петлями (или датчиками), размер которых определяется геоэлектрическими параметрами исследуемой территории и необходимой глубиной исследований (Рис. 1.1).

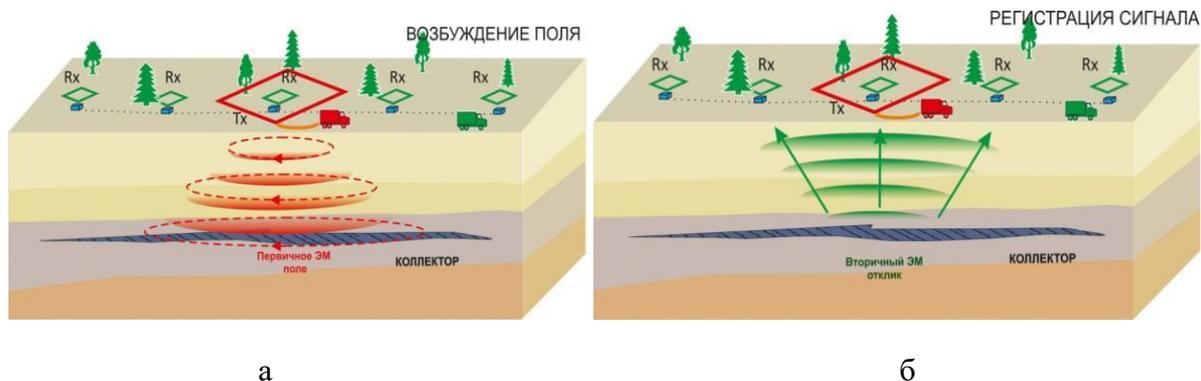


Рис. 1.1 – Принцип возбуждения и регистрации электромагнитного поля:  
 а – возбуждение электромагнитного поля в среде;  
 б – регистрация электромагнитного поля в среде

Для возбуждения поля переходных процессов используется импульсное переключение тока в питающей (генераторной) петле [Каменецкий и др., 1993; Кауфман, Левшин, 2000; Рабинович и др., 1976, 1988]. Наиболее широкое распространение получило ступенчатое возбуждение поля (Рис. 1.2) [McNeill, 1980].

В моменты переключения тока, когда градиент амплитуды индуцируемого магнитного поля отличен от нуля, в проводящей среде индуцируются вихревые токи, проникающие в среду с характерным диффузионным распространением (см. Рис. 1.2). Глубина проникновения поля переходных процессов в землю возрастает с увеличением времени, прошедшего с момента выключения тока в генераторной установке и называемого временем становления поля  $t_c$ . Затухающий ток создает вторичное электромагнитное поле, а его скорость изменения во времени измеряют с помощью приемных датчиков [McNeill, 1980].

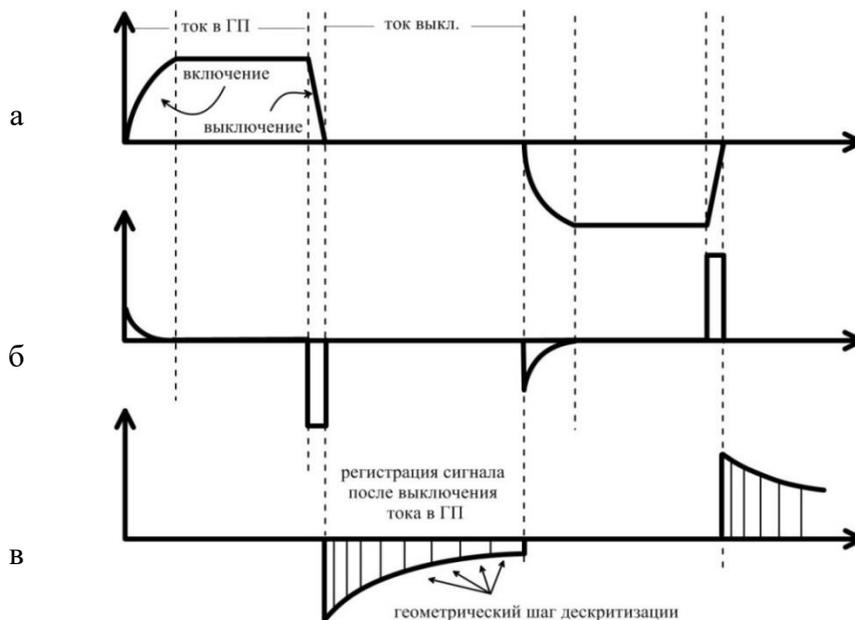


Рис. 1.2 – Форма импульсов тока генератора и сигналов при затухании переходного процесса [McNeill, 1980]:  
 а – ток в генераторной петле (ГП); б – вызванная электродвижущая сила в земле;  
 в – вторичное магнитное поле, измеренное в приемной петле

При этом измеряемый в приемной установке сигнал имеет приближённо экспоненциальный характер, с ростом времени стремясь к нулю. Преобразование сигнала в соответствии с геометрией установки и временем позволяет рассчитать кривую становления поля. Ее вид определяется распределением проводимости в разрезе, что позволяет реализовывать возможность зондирования, изучая зависимость компонент электромагнитного поля от времени. Задача о становлении поля в проводящей среде решается в рамках квазистационарной модели распространения электромагнитного поля, то есть без учета токов смещения. На сегодняшний день доступен достаточно широкий выбор аппаратуры для импульсной электроразведки (метод ЗСБ / метод переходных процессов) как отечественного, так и зарубежного производства. Известными моделями российской аппаратуры являются приборы серии «Цикл» [Захаркин и др., 1982; Захаркин, Лопатин, 1983; Рабинович, 1984], «Импульс» [Гольдорт и др., 1979], TEM-FAST [Barsukov et al., 2007] и др. Среди зарубежных приборов можно отметить наземную аппаратуру WalkTEM шведской фирмы АВЕМ, V8 канадской фирмы Phoenix, а также австралийский TerraTEM.

В рамках данного исследования автором применялась аппаратура SGS-TEM. Данная аппаратура используется с 1999 г. при проведении работ методом ЗСБ и хорошо зарекомендовала себя при работах в регионах с различными физико-географическими условиями и разнообразным фоном помех [Поспеев и др., 1999; Агафонов, Поспеев, 2001; Агафонов, 2005, 2006].

Электроразведочная станция SGS-TEM «Пикет 2» [Шарлов и др., 2010] состоит из следующих основных частей:

– одноканальных телеметрических измерителей «Пикет-2», предназначенных для усиления сигналов от датчиков поля, аналого-цифрового преобразования, накопления и передачи цифровой геофизической и пространственной информации по двухпроводной линии связи; каждый измеритель оснащен приемником GPS;

– бортового модуля, предназначенного для организации обмена данными по двум двухпроводным линиям связи между телеметрическими измерителями и бортовым вычислительным комплексом, а также приема сигнала синхронизации от встроенного приемника GPS либо от внешнего источника (генераторной установки).

Для обработки полевых данных и получения кривых зондирования применяется программный комплекс TEM-Processing, встроенный в программно-аппаратурный комплекс SGS-TEM [Шарлов и др., 2010]. Данная программа позволяет провести осреднение сигналов, подавление помех различной природы как для отдельно взятых записей, так одновременно и для серии выбранных пикетов или стоянок, находящихся в одинаковых геологических и помеховых условиях.

Получение сигналов высокого качества является необходимым условием применения современных высокоточных электромагнитных ЗСБ при изучении месторождений на этапе разработки. Наличие многочисленных помех различного происхождения, а также зависимость от соблюдения технологии регистрации не позволяют использовать статические параметры регистрации и жестко заданный граф обработки для обеспечения высокого качества кривых ЗСБ в любых геоэлектрических условиях. При работе с искусственным электромагнитным полем основными видами помех являются промышленные или техногенные помехи от линий электропередач и других объектов (проявляются на основной частоте и ее гармониках), помехи от электрифицированных железных дорог, низкочастотные магнитотеллурические помехи, нерегулярные помехи от линий связи, высокочастотные радиопомехи, сюда же можно отнести инструментальные помехи.

Подавление помех в ЗСБ осуществляется аппаратурно и программно при помощи фильтрации и декомпозиции сигнала. Необходимо отметить, что особенностью сигналов ЗСБ является их очень большой динамический диапазон. Так, на ранних временах сигнал достигает амплитуды в несколько вольт, тогда как на поздней стадии становления сигнал может составлять доли микровольта. Зарегистрировать столь сильно изменяющийся сигнал за одну запись даже при использовании высокоразрядных систем регистрации с высоким качеством практически невозможно. В связи с этим при регистрации сигналов становления электромагнитного поля в ближней зоне используется принцип накопления с несколькими режимами, предусматривающими изменение величины тока в генераторной петле, шага дискретизации сигнала по времени, коэффициентов усиления каналов и количества импульсов в серии. Итоговая кривая получается в результате сшивки записей по отдельным режимам. [McNeill, 1980; Табаровский и др., 1985].

Повысить соотношение сигнал/шум возможно также и путем увеличения размера питающей петли и тока в ней. Однако в данном случае необходимо учитывать и возможность применения подобного рода установок на практике. Все вышеперечисленные методы позволяют устранять влияние случайных помех [Поспеев и др., 1999; Шарлов, 2017].

При искажениях кривых ЗСБ низкочастотной помехой накопление не принесет пользы. В связи с этим для подавления низких частот применяют регистрацию разнополярных импульсов с соответствующим изменением знака сигнала. Применяется также декомпозиция измеренного сигнала электродвижущей силы (ЭДС) от ЭДС помехи, измеренного при отсутствии полезного сигнала. Для этого ЭДС помехи аппроксимируется некоторой функцией.

### 1.1.1. История развития процесса интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне

Представление о геоэлектрической модели южной части Сибирской платформы менялось в ходе проведения электроразведочных исследований. В середине XX в. методами магнитотеллурического зондирования, теллурических токов и дистанционных электромагнитных зондирований осадочный чехол был аппроксимирован одним слоем, определялись только его мощность и суммарная продольная проводимость.

В 1970-е гг. интерпретация данных ЗСБ преимущественно заключалась в оценке обобщенных параметров разреза (суммарной мощности  $H$  и суммарной проводимости  $S$ ). Эта оценка производилась вручную с использованием асимптотических решений прямой задачи ЗСБ, то есть по асимптотам и координатам минимумов. На смену асимптотике пришли палетки, позволяющие с более высокой детальностью аппроксимировать осадочный чехол тремя-пятью слоями. С развитием электроразведки появились новые методы и подходы, позволяющие повысить детальность интерпретации результатов [Крюкова, 1983, Рабинович, 1973].

В 1980-е гг. появились первые электронно-вычислительные машины и пакеты моделирования сигналов становления [Матвеев, 1990; Эпов, Ельцов, 1992; Могилатов, 1992]. 1D-инверсия посредством электронно-вычислительных машин повысила точность интерпретации и позволила разделить разрез на 5–7 слоев [Бубнов, Татарин, 1977]. Данный подход был удобен для работы с горизонтально-слоистой средой.

Неотъемлемым этапом интерпретации геофизических данных является инверсия (или решение обратной задачи) или количественная интерпретация, которая чаще всего производится посредством подбора теоретической кривой (рассчитанной в ходе решения прямой задачи электроразведки с помощью изменения толщины и УЭС слоев) к практической. Подбирая трансформанты ЭДС, интерпретатор разбивает модель на приемлемое количество слоев, формирует геометрическую форму разреза и модифицирует сопротивления слоев для максимально полного совпадения наблюдаемой и теоретической кривых. Зачастую такое моделирование не позволяет достичь оптимального результата и построить качественную геолого-геофизическую модель, поэтому при интерпретации данных привлекается априорная информация.

Интерпретация осуществляется по трансформантам ЭДС (сопротивлению  $\rho_\tau(t)$  и проводимости  $S_\tau(h_\tau)$  ). В случае установки «петля – петля» кажущееся сопротивление  $\rho_\tau$  рассчитывается по формуле:

$$\rho_\tau(t) = \frac{\mu_0}{\pi t} \left( \frac{Qq\mu_{0l}}{20t\Delta V_q(t)} \right)^{2/3}, \quad (1.1)$$

где  $Q$  и  $q$  – эффективные площади генераторной и приемной петель (с учетом количества витков);  $t$  – время становления;  $\Delta U_q(t)$  – ЭДС в приемной петле;  $I$  – сила тока в генераторной петле;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Наряду с кажущимся сопротивлением  $\rho_\tau(t)$  нередко используется трансформация Сидорова – Тикшаева – зависимость кажущейся продольной проводимости от кажущейся глубины. Кажущаяся продольная проводимость  $S_\tau(h_\tau)$  отражает суммарную продольную проводимость разреза до глубины  $h_\tau$ :

$$S_\tau(h_\tau) \approx \int_0^{h_1} \frac{1}{\rho(z)} dz, \quad (1.2)$$

где функция  $\rho(z)$  здесь описывает изменение сопротивления разреза с глубиной.

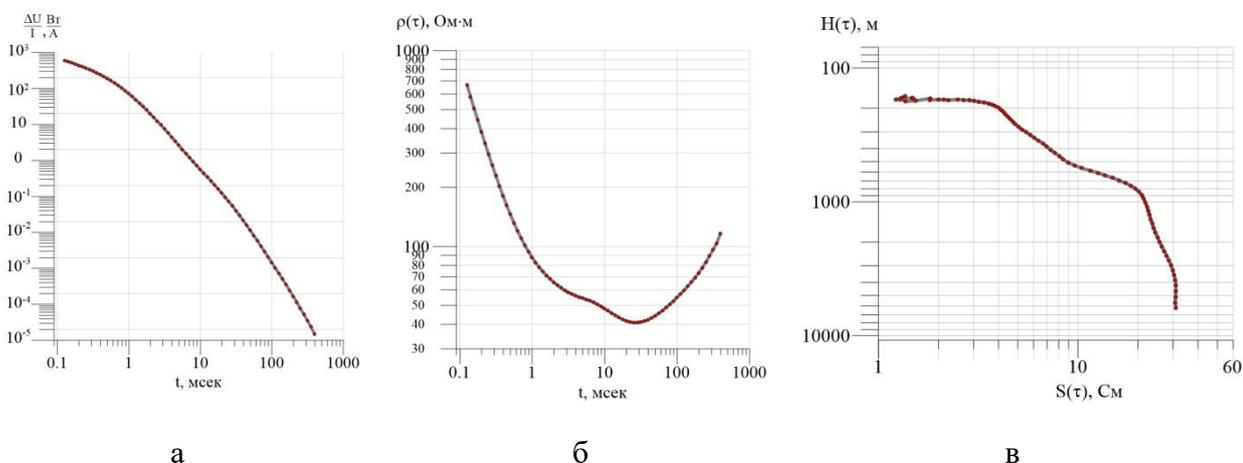


Рис. 1.3 – Результаты полевых измерений ЗСБ:

а – кривая электродвижущей силы, нормированная на ток, б – кривая кажущегося сопротивления, в – кривая кажущейся проводимости

Большое распространение получил подход к закреплённой инверсии данных ЗС. В данном случае интерпретация становится более длительной, и этот подход считается более эффективным, так как в данном случае результат становится согласованным с геологической моделью [Поспеев и др., 2010, 2011, 2018a; Буддо, 2012 и Buddo et al., 2012; Буддо и др., 2018; Мурзина и др., 2016, 2022a]. В начале XXI в. был разработан подход, основанный на тонкослоистой инверсии, позволяющий оценить возможность выделения в геоэлектрическом разрезе тонких слоев путем расчета коэффициента контрастности [Поспеев и др., 2010].

Наиболее частой причиной осложнения кривых ЗСБ, которая требует учета при интерпретации данных ЗСБ магнитной вязкости [Захаркин и др., 1988; Gubbins, Herrero-Bervera, 2007; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Кожевников, Антонов, 2009; Кожевников, 2008, 2012; Шарлов и др., 2021], или эффектов частотной дисперсии сопротивления (индукционно-вызванной поляризации пород (ВПИ)) [Антонов, Шеин, 2008; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019; Баранов и др., 2014; Поспеев и др., 2018б; Мурзина и др., 2022]. Эффекты частотной дисперсии при проведении работ глубинными

установками ЗСБ особенно заметно проявлены на поздних временах становления поля, где они в силу обратного по отношению к индукционным сигналам знака зачастую существенно искажают поведение правых ветвей кривых. Ранее, когда геофизики не располагали средствами для расчета переходных характеристик с учетом ВПИ, ее проявления рассматривались исключительно как помеха, осложняющая изучение распределения «истинной» электропроводности. В этой связи прилагались и до сих пор прилагаются усилия, направленные на снижение или «подавление» эффектов ВПИ. С появлением алгоритмов и быстродействующих программ, использующих для расчета переходных характеристик поля становления комплексную геоэлектрическую модель (Коула – Коула) [Cole, Cole, 1941], влияние полей ВПИ стало поддаваться количественной оценке [Pelton, 1978; Антонов, Шейн, 2008; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019]. В случае наличия эффекта вызванной поляризации в геоэлектрическую модель в соответствии с формулой Коула – Коула задаются следующие параметры: коэффициент поляризации  $\eta$ , время релаксации  $\tau$  и показатель степени  $C$  [Pelton, 1978; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019].

Позднее появляется классификация инверсии в зависимости от размерности восстанавливаемой функции  $\sigma$  (удельной электрической проводимости) физические свойства среды могут быть описаны 1D-, 2D- или 3D-функциями полупространства. Так, методы восстановления  $\sigma(z)$  принято называть 1D-инверсиями,  $\sigma(x, z)$  – 2D-инверсиями, а  $\sigma(x, y, z)$  – 3D-инверсиями (Рис. 1.4). В случае применения 1D-инверсий в результате точечных измерений восстанавливаются параметры горизонтально-слоистой среды, без изменений по латерали [Oldenburg et al., 2005].

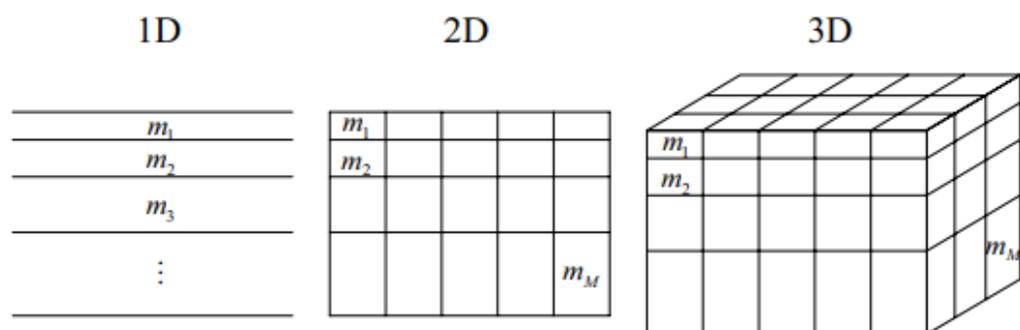


Рис. 1.4 – Пример моделей 1D-, 2D- и 3D-инверсии [Oldenburg et al., 2005]:  
 $m_i$  – искомый параметр модели

В случае 2D-инверсий в результате профильных измерений – параметры квазигоризонтально-слоистой среды и бесконечных вдоль оси  $Y$  локальных объектов. При 3D-инверсии в результате профильных или точечных измерений восстанавливаются параметры объектов, которые могут быть ограничены по всем трем координатам [Oldenburg et al., 2005; Тригубович и др., 2014] Трехмерный подход к инверсии данных применяется в тех

случаях, когда изучаемую среду невозможно аппроксимировать горизонтально-слоистой моделью вследствие присутствия трехмерных неоднородностей [Seminskiy, 2016; Семи́нский и др., 2018а, б].

До настоящего времени основным методом интерпретации результата электроразведочных остается 1D-инверсия, основанная на восстановлении параметров горизонтально-слоистой среды [Эпов, Ельцов, 1992; Могилатов, 1992; Seminskiy, 2016; Pedersen, Ghahibi, 2000]. Наиболее часто при интерпретации электромагнитных зондирований посредством 1D-инверсии строятся квазигоризонтально-слоистые модели среды, позволяющие аппроксимировать реальный разрез в окрестности точки зондирования моделью условно горизонтально-слоистой среды с точностью до эквивалентного модельного класса, либо модели, которые возможно аппроксимировать изменениями по латерали не более 30 % [Колесников, 1995].

### 1.1.2. Понятие некорректно поставленных задач и способы их решения

Конечной целью анализа геофизических полей являются геологические модели, теоретические геофизические поля над которыми совпадают с наблюдаемыми данными. Численное моделирование геофизических полей для параметров заданной модели обычно называют прямой задачей (*англ.*: forward solution). 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 называется невязкой [Oldenburg et al., 2005; Могилатов, 2002; Могилатов и др. 2007; Жданов, 2012]. На практике обычно используется среднеквадратическая погрешность, которая измеряет различия между данными предсказанными  $\rho^{pr}$  и наблюдаемыми  $\rho^{obs}$  значениями кажущегося сопротивления [Жданов, 2012]. С учетом логарифмической шкалы представлению сопротивления формула невязки имеет следующий вид:

$$\delta_{\ln(\rho)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\ln(\rho_n^{pr}) - \ln(\rho_n^{obs}))^2}{N - 1}}. \quad (1.3)$$

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; Жданов, 2012; Самарский, Вабищев, 2009] в отличие от прямой поставлена некорректно. Реальными причинами, осложняющими решение обратной задачи электромагнитных зондирований, являются влияние шума и ошибок измерений. Решения ее либо не существует, либо оно

не единственное, либо не является непрерывной функцией данных. Отсутствие единственности решений делает инверсию сложной или практически невозможной [Тихонов, Арсенин, 1986; Жданов, 2012; Самарский, Вабищев, 2009].

Неединственность решения обратной задачи геофизики [Светов, 1973; Жданов, 2012] применительно к инверсии данных ЗСБ 3D требует использования способов регуляризации решения [Тихонов, Арсенин, 1986]. В 60-е гг. прошлого века российский математик А.Н. Тихонов [Тихонов, Арсенин, 1986] разработал основы теории решения некорректно поставленных задач. Он ввел в решение обратной задачи метод регуляризации, который был основан на приближении некорректно поставленной задачи некоторой последовательностью корректно поставленных задач.

Формальное решение некорректно поставленной обратной задачи может привести к неустойчивым, нереалистичным моделям. Метод регуляризации – это метод добавления некоторой дополнительной информации к условию с целью решить некорректно поставленную задачу [Морозов, 1965, 1966, 1987, 2006]. Метод регуляризации Тихонова [Тихонов, Арсенин, 1986] позволяет находить приближенное решение некорректной задачи. Параметр регуляризации описывает баланс между наилучшим разрешением и наиболее разумной стабилизацией. При малых  $\lambda \sim 0$  проблема приводит к исходной задаче, являющейся некорректной, а при слишком больших  $\lambda$  – к минимизации одного стабилизирующего функционала. Решение данной задачи практически совпадает с априорной моделью.

Общим математическим методом решения некорректно поставленных задач является метод регуляризации А.Н. Тихонова. Большой вклад в эту область внесли М.М. Лаврентьев, Г.И. Марчук, В.К. Иванов, В.Я. Арсенин, В.А. Морозов, А.Б. Бакушинский, В.Б. Гласко и другие советские математики. Из принципов построения регуляризирующих алгоритмов наиболее распространен вариационный принцип. Применяются также другие методы и приемы получения устойчивых решений, например шаговая регуляризация, а также принцип, получивший название итерационной регуляризации. Этот подход оказался наиболее удобным и универсальным при решении различных обратных задач, что обусловило его широкое практическое распространение.

Большую роль при инверсии играет стабилизирующий функционал, главная задача которого заключается в выборе подходящего класса моделей, которые могут использоваться для решения обратной задачи. На практике обычно выбирается модель, являющаяся простейшей (по принципу Оккама). Тем не менее такая модель зачастую может не удовлетворять априорной информации. В таком случае в качестве стабилизирующего функционала выбирается некая априорная модель. Стабилизатор использует минимальную норму различия между априорной и получаемой в результате решения обратной задачи моделью [Constable et al., 1987]. Стабилизаторы такого рода позволяют получать только

сглаженные модели, что не всегда применимо при резкой смене геоэлектрической обстановки. В таком случае применяется стабилизатор с минимальным носителем градиента, который позволяет уменьшить эффект сглаживания.

Испанский физик А. Тарантола предложил технику регуляризации с точки зрения теории вероятности [Tarantola, 1987] или байесовский подход. С байесовской точки зрения многие методы регуляризации соответствуют добавлению некоторых априорных распределений в параметры модели. Цель байесовской инверсии состоит в вычислении апостериорной функции плотности вероятности. Апостериорные вероятности применяются при оценке физических свойств пород. Эта зависимость широко исследовалась для различных геологических сред и может быть экспериментально изучена для конкретного района. Маргинальная плотность вероятности удобна для описания свойств тех или иных параметров, ограниченных априорной информацией. При применении совместной инверсии несколькими методами [Спичак, 2005, 2009, 2010] статистические соотношения между свойствами могут быть лучше (например, средние значения и вариограммы или маргинальные и условные функции плотности вероятности).

### **1.1.3. Методы оптимизации, применяемые при инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне**

После построения целевых функций используется метод оптимизации поиска минимумов этих функций для нахождения решения обратной задачи. Целевые функции могут иметь несколько минимумов, среди них необходимо выбрать самый большой минимум, который называют глобальным по сравнению с остальными – локальными минимумами.

Несмотря на достаточно большое количество алгоритмов оптимизации, задача выбора наиболее эффективного из них является непростой. Сложность формального решения данной задачи обеспечивается довольно большой размерностью пространства параметров. Помимо основного глобального минимума существует множество локальных минимумов, где решение может быть драматически далеко от истинного. Поскольку для решения прямой задачи требуется некоторое время, ее многократное применение приводит к существенным затратам времени на инверсию.

В зависимости от структуры многомерного функционала и используемого алгоритма методы оптимизации характеризуются разной скоростью приближения к глобальному минимуму, возможностями обхода локальных минимумов. В целом, методы многомерной оптимизации делятся на несколько больших классов:

– класс алгоритмов, который помимо значений невязки на предыдущих шагах использующий значения градиента функционала (наискорейший спуск, метод сопряженных градиентов, метод Ньютона и т. п.). Методы градиентного спуска – это численные методы,

которые решают нелинейную задачу линеаризацией вокруг начального приближения. На каждой итерации модель обновляется, итерации прекращаются, когда достигается минимизационный критерий. Примерами данного метода решения задачи инверсии являются метод Ньютона и метод сопряженных градиентов, а также метод градиентного спуска [Гилл и др., 1985], широко использующиеся в геофизике благодаря их простоте. Найдя минимум путем расчета значений частных производных по каждому из параметров, находят прямой путь вниз по склону целевой функции к минимуму;

- методы глобальной оптимизации, являющиеся аналогами природных систем, считаются более устойчивыми. В первом из них используются только значения функционала на предыдущих шагах (покоординатный спуск, метод Нелдера – Мида и т. п.). Их отличает умеренная скорость минимизации. Кроме того, в большинстве случаев они не ухудшают стартовую невязку;

- совершенные методы глобальной оптимизации, основанные на предположении о случайном поведении параметров модели и более полном представлении и анализе целевых функций, включают методы Монте-Карло, генетические алгоритмы, метод имитационного отжига, искусственные нейронные сети [Беркинблит, 1993], метод роя частиц [Kennedy, Eberhart, 1995], эволюционные алгоритмы и др. [Жиглявский, 1991; Sen, Stoffa, 2013]. Стохастические методы, часто называемые также методами Монте-Карло, основаны на генерации большого числа реализаций стохастического процесса и принятии решений об их приемлемости [Спичак, 2005, 2009, 2010]. Общая идея состоит в имитации известных из природы или физики процессов, которые обладают теми же вероятностными характеристиками [Sambridge, Mosegaard, 2002]. С этой целью часто используют алгоритм «выборки Гиббса» (англ.: Gibbs sampling) [Geman, Geman, 1984], «генетические» алгоритмы (англ.: genetic algorithms) [Holland, 1975; Haupt, Haupt, 2004; Moorkamp et al., 2006, 2007, 2010, 2011], а также алгоритмы «имитации отжига» (англ.: simulated annealing) [Kirkpatrick et al., 1983; Aarts, Korst, 1989; Bertsimas, Tsitsiklis, 1993; Mota, Monteiro Santos, 2010; Harris, MacGregor, 2007]. Наиболее гибким подходом, который позволяет увязывать данные полевых экспериментов и априорную геолого-геофизическую информацию с построением адекватных моделей среды, является байесовский статистический подход, впервые предложенный для комплексной инверсии геофизических данных в работе [Гольцман, Калинина, 1973]. Позднее он получил развитие в публикациях [Tarantola, 1987; Backus, 1988; Mosegaard, Tarantola, 1995; Bosch, 1999; Bosch et al., 2001; MacCalman et al., 2014].

Стохастические подходы более, чем детерминистские, удобны для комплексной интерпретации разных типов геофизических данных, так как предоставляют инструментарий для формализованного учета априорно геолого-геофизической информации, а также

экспертных оценок. Кроме того, на выходе исследователь получает не только распределения искомым параметрам, но и апостериорную оценку их неопределенности в каждом узле пространственной сетки. К трудностям байесовского подхода следует помимо прочего отнести необходимость задания априорных моделей по всем параметрам, предположение о гауссовом характере их распределения, а также трудности вычислительной реализации, требующей огромных объемов оперативной памяти и времени счета, исчисляемого неделями даже при использовании многопроцессорных вычислительных систем. Одним из примеров является методология комплексной инверсии [Bosch, 1999], на входе которой имеются наборы геофизических данных, петрофизическая и геостатистическая, геологическая информация, которая описывает структуру модели в статистических терминах.

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

В последние годы широкое развитие получило использование совмещенных высокоплотных сетей сейсморазведки МОГТ 3D и ЗСБ 3D. Слабая роль структурного фактора в локализации месторождений углеводородов побуждает исследователей в качестве первоочередной рассматривать задачу непосредственного картирования зон коллекторов. Это предопределяет необходимость развития современных динамических методов анализа сейсмических материалов [Козлов, 2006], а также использования несейсмических методов нестационарных электромагнитных зондирований совместно с сейсмическими методами (МОГТ 3D). Геологическая эффективность их применения обусловлена соответствующими петрофизическими характеристиками горизонтов-коллекторов, являющихся контрастными объектами для картирования их электроразведкой. МОГТ 3D и ЗСБ 3D в комплексе позволяют детально исследовать свойства и параметры горизонтов-коллекторов и повышать объективность оценки ресурсов и запасов углеводородов.

При адаптации подхода к практическим данным необходимо учитывать все особенности интерпретации электромагнитных зондирований, так как на практике процесс интерпретации оказывается всегда более сложным, чем на синтетических моделях. Необходимо не только иметь полное представление о геологическом строении изучаемой среды и целевых интервалов, но также уделять внимание особенностям проявления эквивалентности решения при увеличении количества изучаемых горизонтов, но так же проявлению влияния эффектов магнитной вязкости [Захаркин и др., 1988; Gubbins, Nettleton, 2007; Кожевников, Снопков, 1990, 1995; Кожевников, Антонов, 2009; Кожевников, 2008, 2012; Шарлов и др., 2021] и частотной дисперсии сопротивления – индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) пород [Антонов, Шеин, 2008; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019; Поспеев и др., 2018б; Мурзина и др., 2022]. При этом необходимо понимать возможности выделения целевых интервалов и чувствительность

метода к их изучению. Автором предложен и используется способ интерпретации данных площадных съемок ЗСБ 3D, а так же рассмотрен подход позволяющий оценивать возможность разделения геоэлектрических горизонтов в зависимости от геологической модели.

### **1.2.1. Существующие подходы латеральной ограниченной инверсии в анизотропных и квазигоризонтально-слоистых средах**

В 1994 г. первые алгоритмы, направленные на применение подхода латеральной инверсии, были представлены зарубежными исследователями Д.У. Ольденбургом и Я. Ли (1994) [Oldenburg, Li, 1994], М.Х. Локе и Р.Д. Баркером [Loke and Barker, 1996], а также Р.В.Л. Пиньейру [Pinheiro, 1997]. Эти алгоритмы создают гладкие модели в разрезе с минимальным количеством слоев.

Для обеспечения латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистой среды задаются ограничения для модельных данных при помощи ковариационной матрицы шероховатости, построенной на основе априорной информации, и применяемой 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. Модель создается с использованием боковых ограничений латеральной проводимости в слое и глубины слоев. Априорная информация может быть добавлена в любой точке профиля, информация мигрирует через боковые ограничения к соседним узлам [Auken, Christiansen, 2004]. Инверсия направлена на изучение разрезов, осложненных неотектоникой и другими геологическими явлениями разрезов небольшой глубинности до 30 м (рис. 1.7).

В большинстве случаев исследователь может предположить, что изучаемую геологическую среду возможно аппроксимировать квазигоризонтально-слоистой средой, как это чаще всего бывает в осадочных средах или при большинстве гидрогеологических исследований [Christensen, Sørensen, 1998]. Часто в квазигоризонтально-слоистых осадочных средах достаточно одномерного решения с боковыми ограничениями [Auken et al., 2002]. По данным априорной информации закрепляется глубина, и в рамках закрепленной модели происходит вариация геоэлектрических параметров. На практике же при решении нефтегазописковых задач в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей сред такой подход не всегда применим. Во-первых, не всегда имеется достаточное количество априорной информации. Во-вторых, не всегда понятно, в какой мере можно «распространять» типичную геоэлектрическую модель среды, полученную в одной точке исследуемой среды на основании данных бурения скважин.

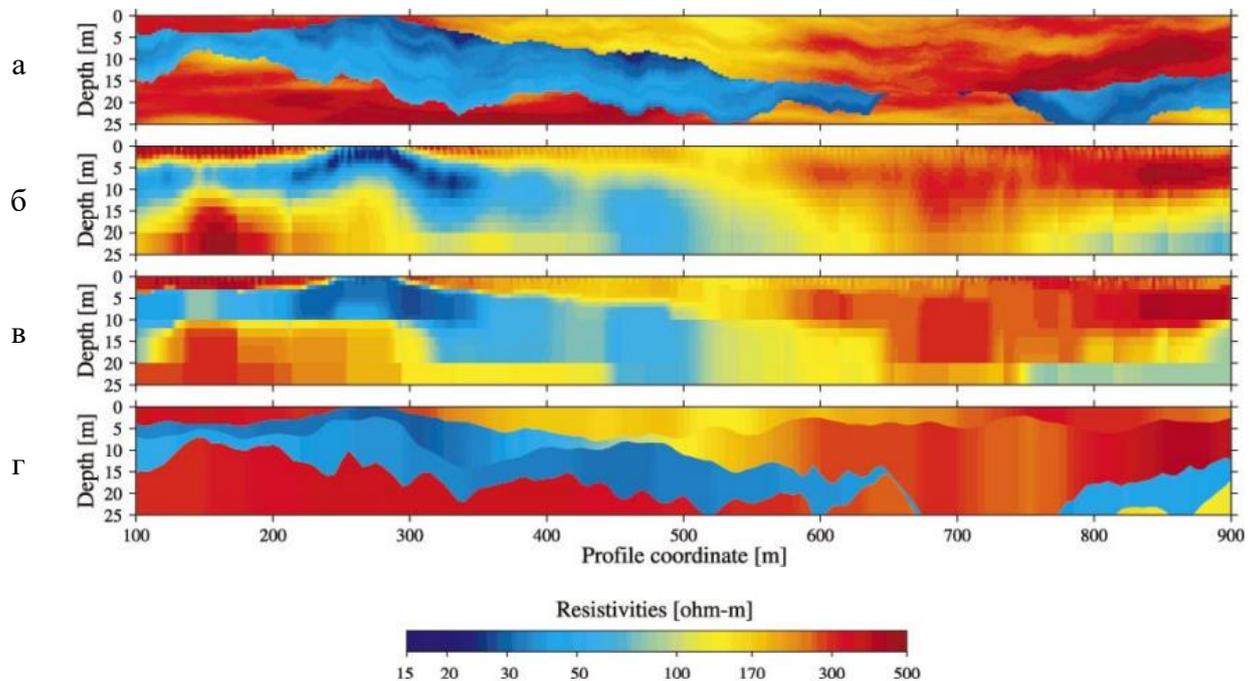


Рис. 1.5 – Результаты применения латеральной закрепленной инверсии [Auken, Christiansen, 2004]:

а – исходная модель; б, в – результат с минимальной структурной нормировкой и латеральной закрепленной инверсией; г – результат латеральной закрепленной инверсии 2D

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 (Рис. 1.6) [MacGregor, 2015]. Целью предложенного подхода совместной интерпретации является получение обоснованной геологической модели исследуемой среды, соответствующей всем данным априорной информации.

Схожий подход применяется при решении нефтегазопроисковых 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., 2018а; Буддо, 2012 и Buddo et al., 2012; Буддо и др., 2018]. При решении нефтегазопроисковых задач 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 нефтегазопроисковых задач [Агафонов и др., 2004; Буддо и др., 2018, 2021; Семинский, 2017; Поспеев и др., 2018а; Кубышта и др., 2014; Oshmarin et al, 2016; Токарева и др., 2017].

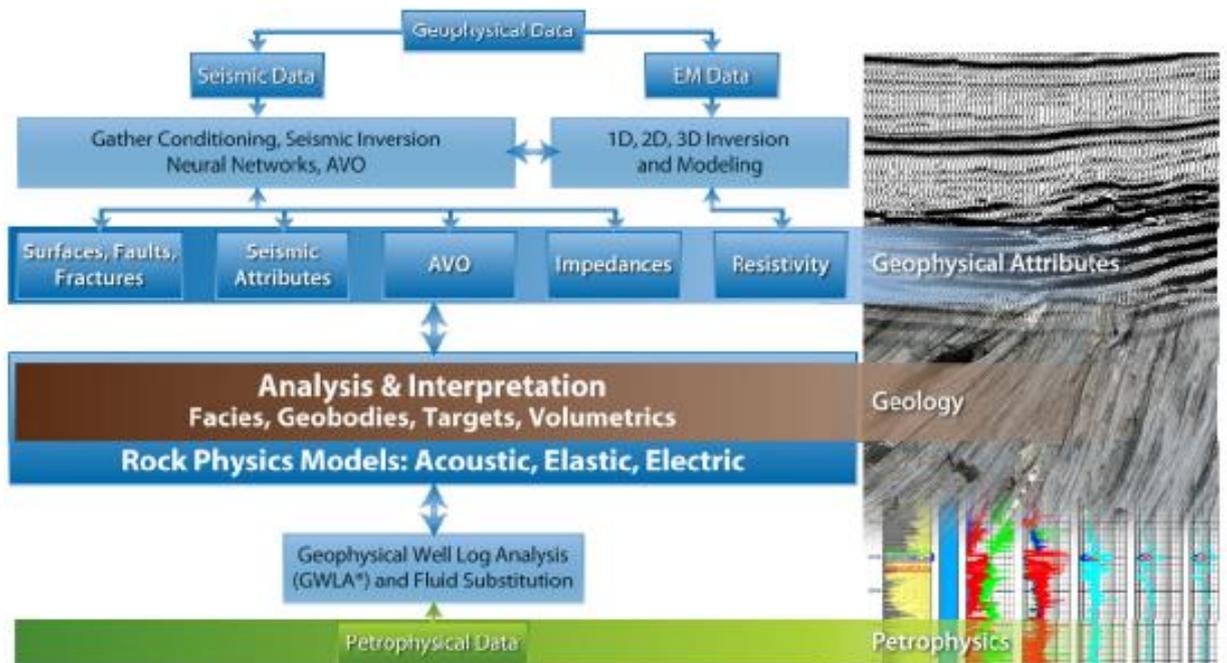


Рис. 1.6 – Процесс совместной интерпретации, применяемый к данным сейсморазведки, каротажа скважин и электроразведки методом CSEM [MacGregor, 2015]

### 1.2.2. Классификация сетей наблюдений

Существуют различные модификации сетей наблюдения [Буддо, 2012; Семинский, 2017], которые в большинстве своем зависят от стадии геолого-разведочных работ, на которых проводятся изыскания методом ЗСБ. В ходе работ чаще всего используются много-разносные установки с квадратными незаземленными петлями.

– Линейная система наблюдений является наиболее простой. В данном случае от одной генераторной петли сигнал регистрируется на нескольких пикетах вдоль профиля. Работы проводятся как по профилям, так и по любым доступным дорогам, что позволяет охватить исследуемую площадь сетью относительно небольшой плотности (Рис. 1.7, а).

– Система наблюдений под названием широкий профиль является модификацией линейных (профильных) наблюдений. Главным ее достоинством считается высокая пространственная плотность наблюдений при проведении работ вдоль доступных дорог и профилей.

– Площадная регулярная и нерегулярная высокоплотная сеть наблюдений (ЗСБ 3D), как правило, подразумевает проведение работ по сети профилей площадной сейсморазведочной съемки (Рис. 1.7, б). При этом достигается равномерное расположение приемников и источников по площади исследований. Высокая пространственная плотность наблюдений позволяет решать геологические задачи с наименьшей эквивалентностью решений. Возможна совместная интерпретация высокоплотной сейсморазведки и высокоплотной съемки ЗСБ.

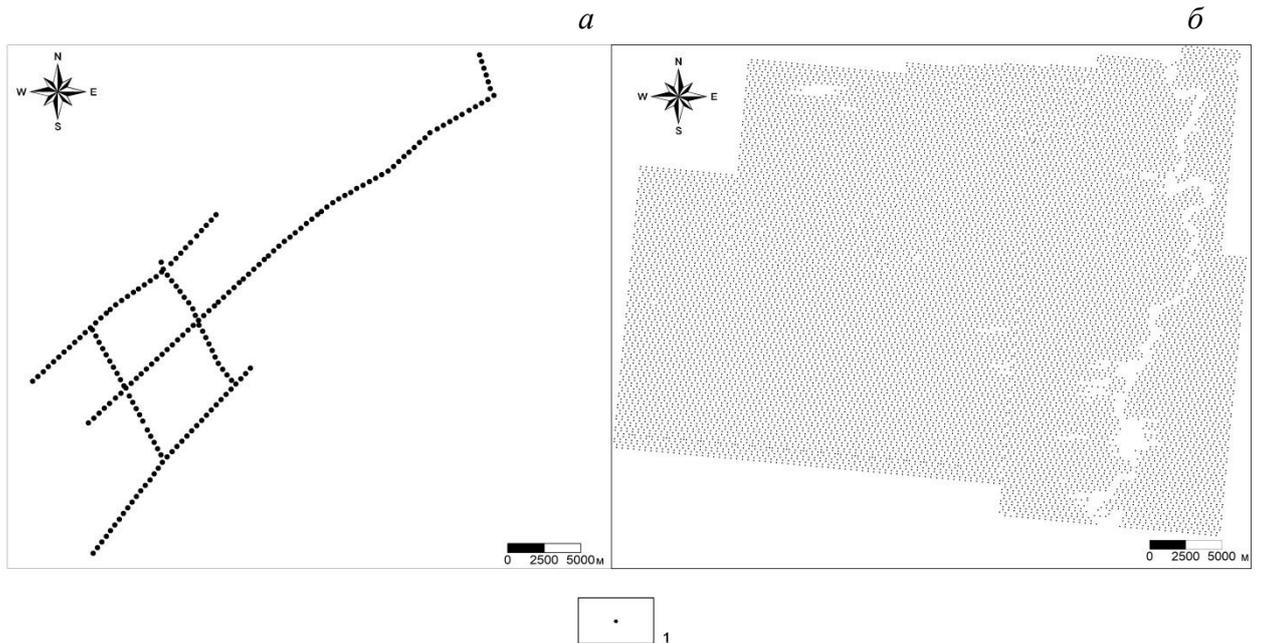


Рис. 1.7 Схемы наблюдений ЗСБ  
 а – профильная сеть наблюдений; б – площадная сеть наблюдений.  
 1 – пункты ЗСБ

Таким образом, при переходе к решению более сложных нефтегазопроисследовательских задач происходит не только уплотнение сети наблюдений, но так же повышаются требования к результативной модели.

### 1.2.3. Формирование структурного каркаса и оценка чувствительности к изучению целевых интервалов

Как известно, качество инверсии напрямую зависит от заложенной априорной информации, поэтому, чем ближе к истине стартовая модель, тем выше достоверность результата [Жданов, 2012]. В зависимости от стадии проведения геолого-разведочных работ и поставленных перед электроразведочными работами задач применяются разные подходы к принципу построения физико-геологической модели и ее детальности. При интерпретации данных ЗСБ, направленных на решение нефтегазопроисследовательских задач, немаловажной является правильность построения модели, в том числе учет структурных особенностей месторождения и особенностей распределения физико-геологических свойств. После сбора всей априорной информации осуществляется построение структурных карт по опорным горизонтам, определяется положение известных геологических структур и разрывных нарушений. Также осуществляется оценка при распределении электрических характеристик по участку работ, осуществляется подбор структуры первоначальной геоэлектрической модели разреза в соответствии с построенными структурными картами.

После формирования структурного каркаса проводится непосредственно построение геоэлектрической модели.

Для построения структурной модели анализируется информация по скважинам глубокого бурения, располагающимся на исследуемой площади, изучаются данные геофизических исследований скважин (ГИС), определяются региональные проводящие и высокоомные маркерные горизонты, отмечается положение кровли кристаллического фундамента и осуществляется литолого-стратиграфическая привязка слоев по данным сейсморазведки МОГТ. Выделяемые опорные горизонты зачастую характеризуются контрастными геоэлектрическими параметрами, и по сети скважин определяется их выдержанность по мощности и простиранию.

Геоэлектрические модели формируются для каждого единичного зондирования индивидуально. Модель представляет собой набор слоев, каждый из которых характеризуется мощностью, удельным электрическим сопротивлением (УЭС) и параметрами поляризации при необходимости. Кровля и подошва слоев задаются по данным бурения и сейсморазведки. Чаще всего, надсолевая часть разреза данными сейсморазведки не представлена – толщины слоев формируются исходя из анализа геологических и гидрогеологических карт и межскважинной интерполяции данных бурения. Варианты задания стартовых УЭС слоев разные и зависят от количества уже известной на момент моделирования информации о площади исследования. Параметры поляризации слоев могут быть заданы также по архивным данным электроразведки, на основании исследования скважин (содержание пирита в поднятом керне) и аналитически (анализ расхождения кривых ЗСБ с разным разносом, отписанных от одного источника ЭМ поля).

Детальность формирования геоэлектрической модели зачастую зависит от этапа проведения геологоразведочных работ и поставленных перед методом задач [Поспеев и др., 2018a]. На Рис. 1.8 приведены упрощенная и более детальная геоэлектрические модели одного из участков юга Сибирской платформы. Дальнейшим развитием моделирования среды является подход с использованием тонкослоистой модели [Поспеев и др., 2010; Буддо, 2012], направленной на изучение геоэлектрических свойств горизонтов-коллекторов.

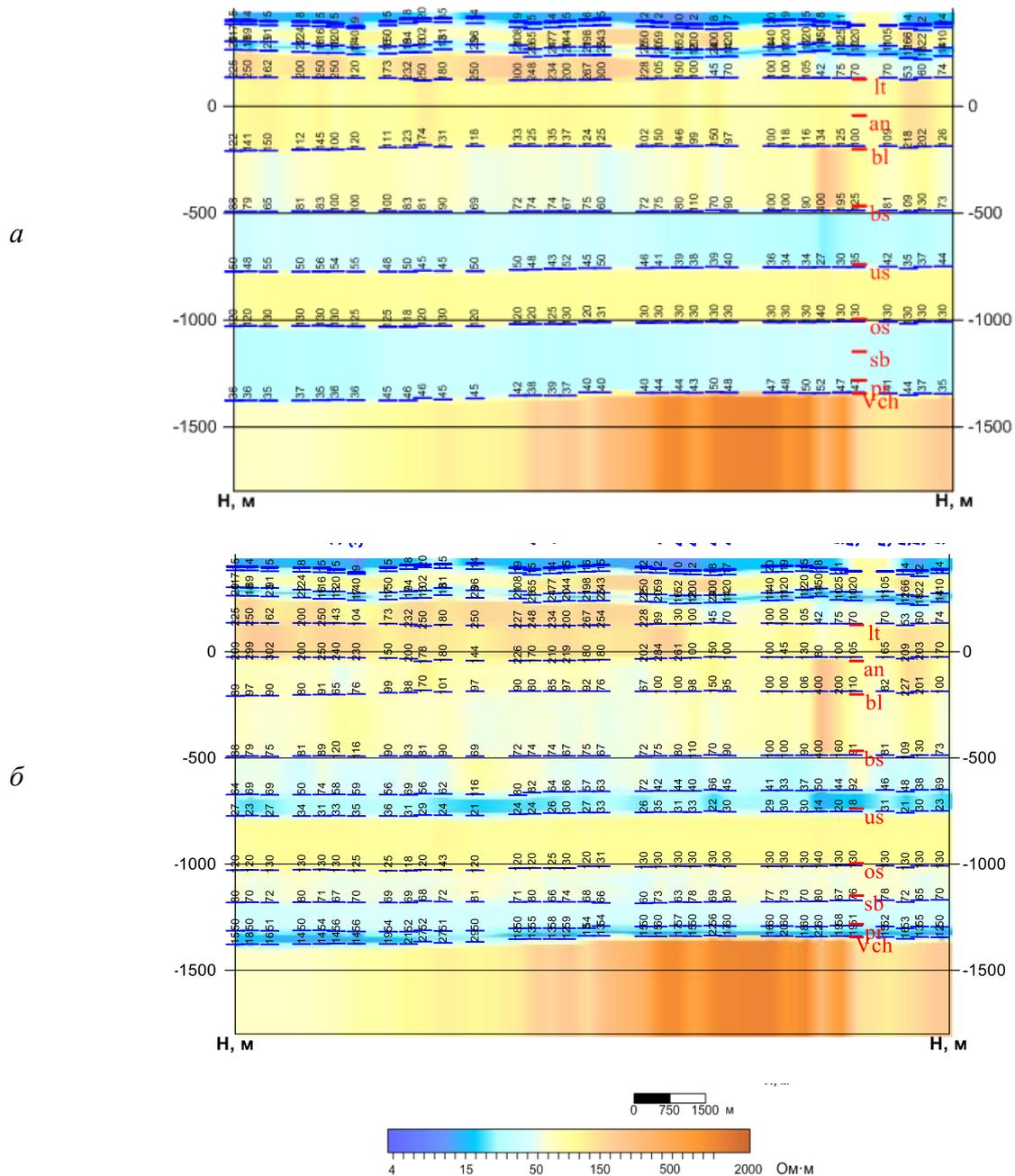


Рис. 1.8 Геоэлектрический разрез в зависимости от стадии геолого-разведочных работ  
 а – геоэлектрический разрез в упрощенном структурном каркасе;  
 б – геоэлектрический разрез в детальном структурном каркасе.

Большую роль при переходе к более детальным моделям сред играет понимание чувствительности метода ЗСБ к изменениям геоэлектрических параметров среды [Табаровский, и др., 1988; Табаровский, Эпов, 2006; Никитенко, 2019; Буддо, 2012; Семинский и др., 2019]. Известно, что результаты инверсии в той или иной степени эквивалентны, и при повышении детальности геоэлектрических моделей вопрос о возможности изучения элементов модели встает достаточно остро [Буддо, 2012; Семинский и др., 2019]. Чувствительность кривых ЗСБ к изменению геоэлектрических параметров горизонтов оценивается на основании предварительного моделирования [Буддо, 2012; Емельянов и др., 2016; Семинский и др., 2019; Мурзина, 2022a]. Оценку эквивалентности геоэлектрических пара-

метров удобно осуществлять при аппроксимации окрестностей минимума кривой функционала невязки (при перераспределении проводимости между двумя горизонтами) параболой [Поспеев и др., 2010], крутизна которой обратно пропорциональна эквивалентности решения. Возможно так же оценить эквивалентность решения путем применения стохастических алгоритмов инверсии (например, метода Монте-Карло) [Алешин, 2012; Мурзина, 2018].

#### 1.2.4. Типичная геоэлектрическая модель осадочного чехла юга Сибирской платформы

Как уже отмечалось выше, 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. Типичная геоэлектрическая модель состоит из 8–10 горизонтов, границы которых, за исключением верхних, обычно закрепляются по данным сейсморазведки и бурения [Поспеев и др., 2018a].

Первый комплекс – подсоловой – включает в себя терригенно-карбонатные отложения непской, тирской, катангской, собинской, тэтэрской свит и осинского горизонта усольской свиты. С подсоловым комплексом осадочного чехла связаны основные перспективы нефтегазоносности. В пределах комплекса расположены карбонатные (осинский, усть-кутский, преображенский) и терригенные (верхнечонский) нефтегазоносные горизонты. Эти горизонты занимают различное гипсометрическое положение, но обладают сходным структурным планом. Отложения подсолового комплекса стратиграфически связаны с карбонатными и терригенными отложениями венда и нижнего кембрия. С учетом разрешающей способности практических кривых ЗСБ и данных глубокого бурения скважин (ГИС) подсоловой комплекс может быть подразделен на три подгоризонта с разными геоэлектрическими характеристиками (Таблица 1.1).

Таблица 1.1

Физико-геологическая модель территории исследований

Номер слоя	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Мощность, м	Геологическое описание
1	170	140	Юрские отложения, J
2	200	250	Илгинская, верхоленская свита, $E_3$
3	150	300	Литвинцевская свита, $E_{1-2}$
4	300	200	Ангарская свита, $E_1$
5	50	250	Бельско-булайский комплекс, $E_1$
6	300	400	Усольская свита, $E_1$
7	150	100	Осинский и усть-кутский горизонты, $E_1$
8	80	120	Собинская, тэтэрская свиты, $E_1$
9	45	100	Катангская, чорская свиты и KB, V– $E_1$
10	2000	–	Архейский фундамент

Верхний подгоризонт включает карбонатные отложения осинского и усть-кутского горизонтов и отличается пониженным продольным сопротивлением (десятки Ом·м) лишь при улучшении их коллекторских свойств. Средний подгоризонт сложен карбонатными породами собинской, тэтэрской свит и обладает продольным сопротивлением в первые сотни Ом·м. Нижний подгоризонт, являющийся целевым объектом исследований, объединяет преображенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания и характеризуется диапазоном продольного сопротивления 16–200 Ом·м.

Второй комплекс – соленосный – включает отложения литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит среднего и нижнего кембрия. Суммарная толщина комплекса составляет 1100–1200 м, при этом для него характерно переслаивание пластов солей и карбонатов. Поскольку УЭС солей крайне велико, его величина применительно к отложениям карбонатно-галогенного комплекса в основном определяется поведением карбонатной части разреза, в частности наличием в его пределах ряда региональных флюидонасыщенных зон коллекторов. Таким образом, максимальное УЭС горизонтов карбонатно-галогенного комплекса достигает 300–500 Ом·м, а минимальное снижается до первых десятков Ом·м. Всего по данным ЗСБ комплекс дифференцируется на 4 горизонта.

В геоэлектрическом плане наиболее контрастным является надсолевой комплекс осадочного чехла, объединяющий отложения среднего – верхнего кембрия (верхоленская, илгинская свиты), а также юрские и четвертичные отложения. Пониженные значения удельного сопротивления (до 20–80 Ом·м) связаны с наличием водонасыщенных горизонтов-коллекторов в отложениях юры и верхнего кембрия (см. Таблица 1.1).

Породы кристаллического фундамента являются основным опорным горизонтом, который обладает высоким удельным сопротивлением, как правило, превышающим 1000 Ом·м (См. Таблица 1.1).

Таким образом, разрез осадочного чехла сложен породами, различающимися по продольному сопротивлению, что является благоприятным фактором для изучения методом ЗСБ. Корреляция геоэлектрических и коллекторских свойств горных пород дает возможность изучать зоны распространения коллекторов во всех интервалах разреза.

#### **1.2.5. Стандартная методика инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне**

Традиционная методика интерпретации данных ЗСБ представляет собой инверсию каждой точки зондирования в ручном режиме. Как известно, качество инверсии напрямую зависит от заложенной априорной информации, поэтому, чем ближе к истине стартовая модель, тем выше достоверность результата [Жданов, 2012]. В связи с этим с целью минимизации влияния принципа эквивалентности количественная интерпретация осуществ-

ляется в режиме закрепления толщин подбираемых слоев, а геоэлектрические границы выбираются в соответствии с отражающими границами по МОГТ. Далее производится подбор геоэлектрической модели с учетом трансформант ЭДС, зарегистрированных для каждого приемника электромагнитного поля. В случае наличия эффекта вызванной поляризации задаются параметры: коэффициент поляризации  $\eta$ , время релаксации  $\tau$  и показатель степени  $C$ . На основе полученных моделей строятся геоэлектрические разрезы по выбранным линиям (профилям) и карты геоэлектрических параметров [Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013].

Задание стартовых геоэлектрических моделей является нетривиальной задачей. Чаще всего используется либо стандартная (типичная) геоэлектрическая модель, либо модель предыдущей интерпретируемой точки. Предпринятые в ряде случаев попытки использовать данные бокового каротажа скважин, пробуренных на юге Сибирской платформы, показали, что значения продольного сопротивления пласта, получаемые при инверсии данных индукционного зондирования, и кажущегося сопротивления, измеряемого трёхточечной установкой постоянного тока, в условиях сильно анизотропного разреза и крайне низкого УЭС бурового раствора, могут различаться существенно. Поэтому применение данных БК, как правило не приближает стартовые модели к истинным [Поспеев и др., 2014]. Данный подход применим в случае проводящих слабоанизотропных геоэлектрических разрезов (слабоконтрастные разрезы Западно-Сибирской плиты и схожих по геологическому строению регионов) [Емельянов и др., 2017].

В случае применения стандартной методики функционал невязки рассчитывается для одной точки в соответствии с формулой (см. гл. 1 § 1.7). Особенностью методики ручной инверсии являются довольно высокие трудозатраты, связанные с необходимостью анализа априорной информации и использованию трудоемкого процесса корректировки, а также неизбежной субъективностью результатов. Изменение структурных планов при повторной инверсии данных требует экспресс-переинтерпретации большого количества материала в сжатые сроки. При этом при инверсии методом ручного подбора задаются близкие параметры УЭС, что зачастую приводит к вытягиванию модели по профилю (Рис. 1.9, а). Применение поточечной инверсии ввиду детализации структурного каркаса вносит при инверсии ряд неоднозначностей, связанных с качеством полевого материала и особенностями алгоритмов оптимизации (Рис. 1.9, б). Таким образом, получаются схожие значения невязок, при довольно разных моделях УЭС.

Таким образом, при переходе к плотным сетям наблюдений, когда количество полевого материала возрастает в разы, возникает необходимость автоматизации процесса инверсии и унификации существующих алгоритмов; становится актуальным построение

более унифицированных алгоритмов оптимизации обратной задачи ЗСБ, адаптированных под поставленные нефтегазопроисковые задачи на территории Восточной Сибири.

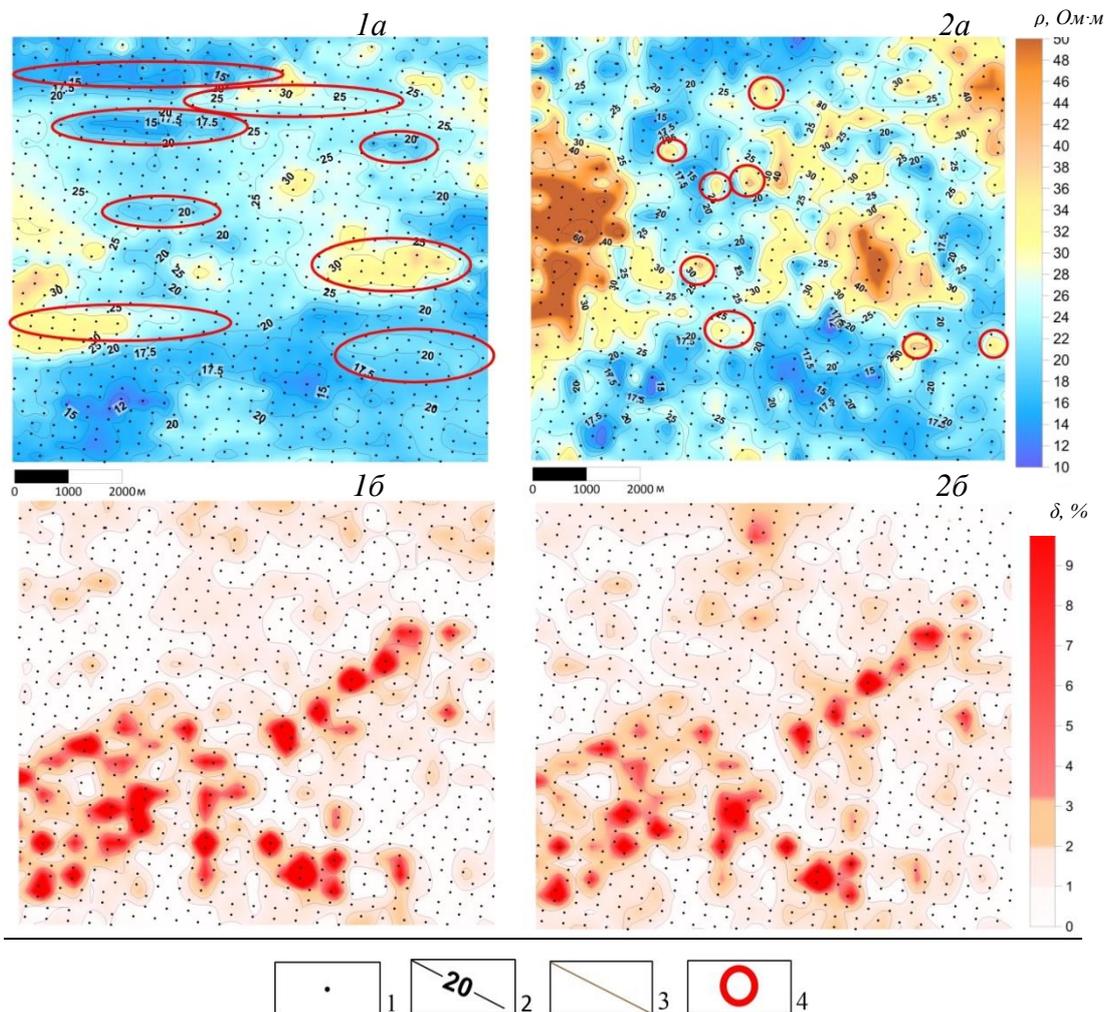


Рис. 1.9 – Примеры результата применения стандартной методики интерпретации на примере целевого интервала для одного участка исследований:

1а – карта УЭС в результате ручной инверсии методом подбора; 1б – карта невязок в результате инверсии методом подбора; 2а – карта УЭС в результате поточечной инверсии; 2б – карта невязок в результате поточечной инверсии.

1 – пункты ЗСБ; 2 – изолинии УЭС, Ом·м; 3 – изолинии невязки, %;

4 – локальные аномалии и выбросы при инверсии.

### 1.2.6. Адаптация подхода пространственного накопления к инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне

*Сбор априорной информации.* Инверсия проводилась в рамках закрепленного структурного каркаса по данным сейсмозондирования МОГТ 3D [Мурзина и др., 2016а]. На первом этапе интерпретации инверсия кривых ЗСБ выполнена для упрощенной геоэлектрической модели. Надсолевая часть разреза  $S_1$ , представленная отложениями верхоленской свиты, подбирается путем вариации как УЭС, так и мощностей в рамках закрепленной суммарной мощности верхоленских отложений. Солевые и подсолевые отложения

подбираются в рамках закрепленного структурного каркаса. Инверсия проводится поточно для всего временного интервала кривой ЗСБ.

На втором этапе интерпретации инверсия кривых ЗСБ выполнена также для упрощенной геоэлектрической модели. Солевая часть разреза  $S_2$  и подсолевая часть разреза  $S_3$  подбираются в рамках закрепленного структурного каркаса. Далее производится уточнение геоэлектрической модели с учетом трансформант ЭДС, зарегистрированных для каждого приемника электромагнитного поля, а также фиксация ВПИ по методике, адаптированной для площадных зондирований [Мурзина и др., 2016а; Компаниец и др., 2019].

На третьем этапе для выполнения детальной интерпретации подсолевой комплекс был разделен на три подгоризонта (Рис. 1.10).



Рис. 1.10 – Схема последовательности инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне, основанная на практических данных

На Рис. 1.11 показана схема разделения подсолевого комплекса и диаграммы кажущегося сопротивления, полученные путем осреднения данных бокового каротажа, в сопоставлении без разделения и с разделением на три горизонта. При переходе к детальной модели при инверсии данных ЗСБ участвуют горизонты, относящиеся к целевым интервалам подсолевых и солевых отложений. Целевой интервал (ЦИ) – геоэлектрический горизонт 1, включающий в себя терригенные пласты  $ВЧ_1$  и  $ВЧ_2$ .

Существенным отличием предлагаемого подхода является то, что инверсия для каждого изучаемого интервала глубин проводится с применением пространственного фильтра, размерность которого увеличивается с глубиной [Мурзина и др., 2016a]. Например, радиус накопления при инверсии для отложений надсолевого комплекса составляет 500 м., для солевого – 1500; для подсолевого комплекса достигает 2000 м.

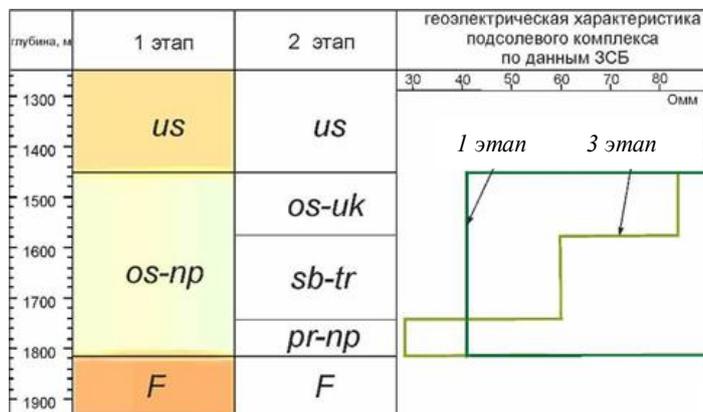


Рис. 1.11 – Модель подсолевого комплекса, принятая к инверсии на третьем этапе

Далее, для обоснования предлагаемого подхода от типичной геоэлектрической модели проведено математическое моделирование, в рамках которого показана его эффективность.

### 1.2.7. Обоснование функции пространственной невязки

При решении обратной задачи средствами одномерной интерпретации для точной оценки геоэлектрических параметров важно учитывать, какой объем зондируемого пространства в целом занимают вихревые токи при проникновении в исследуемую среду [Табаровский и др., 1988]. Изменение первичного магнитного поля создает вихревые токи, которые можно аппроксимировать кольцом. После выключения первичного магнитного 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 опускается вниз по разрезу, обратно пропорциональна его удельной электропроводности. В свою очередь затухание вихревых токов создает вторичное магнитное поле [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 слоев, их равномерное распределение нарушается, вследствие чего сигнал ЭДС, регистрируемый на зажимах приемной петли, осложняется влиянием неоднородности.

Применительно к конкретным геоэлектрическим условиям эффективный объем распространения вторичного электромагнитного поля возможно оценить с помощью трехмерного математического моделирования. Для этого проведены соответствующие ма-

тематические расчеты с использованием программы GEO-EM, разработанной специалистом Новосибирского государственного технического университета М.Г. Персовой [Персова, 2011]. Расчеты синтетических кривых ЗСБ проводились для установок, применяемых в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (Рис. 1.12а). Инверсия (восстановление) модельных данных производилась с помощью модуля автоматической одномерной инверсии, разработанного на базе Model 3 [Суров, 2004; Агафонов и др., 2006а,б], встроенного в программный комплекс SGS-TEM [Шарлов, 2017]. В качестве референтной использовалась типичная геоэлектрическая модель, по проводимости надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов близкая к типичной геоэлектрической модели юга Сибирской платформы (см. главу 1.2.2, Таблица 1.1).

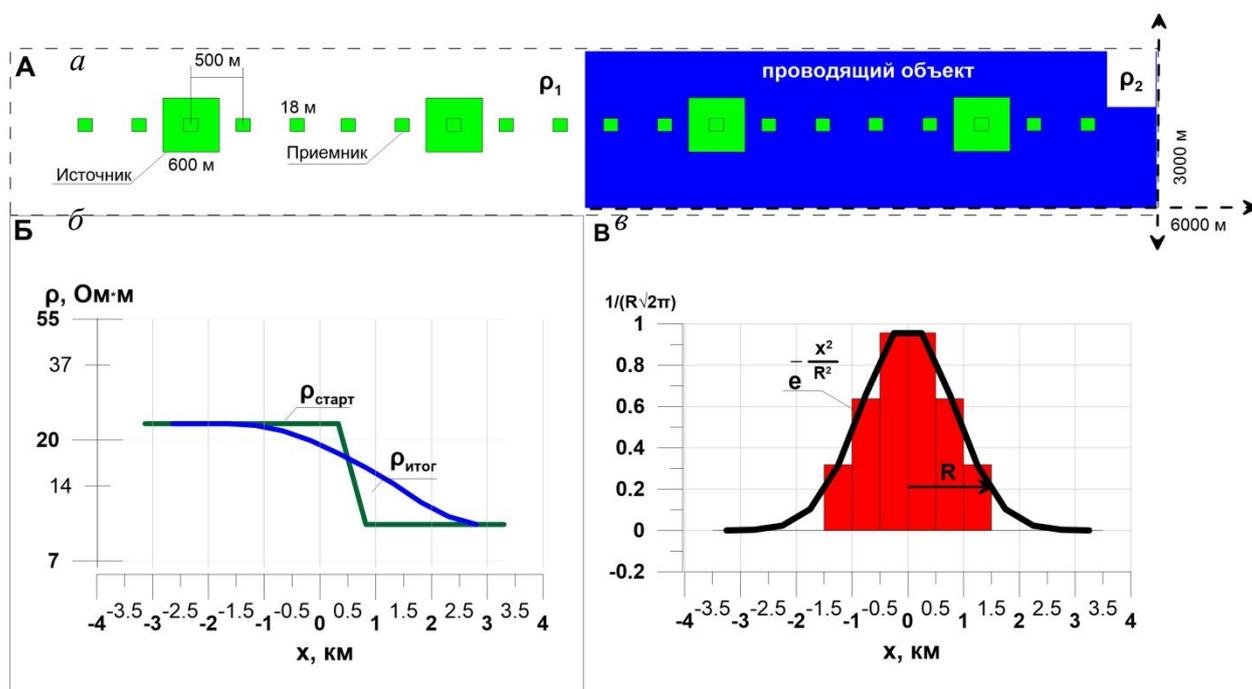


Рис. 1.12 – Схема 3D-моделирования по профилю и результат:

- а – схема профиля и положения токопроводящего объекта на глубине 1800 м; б – график исходного и восстановленного значения удельного электрического сопротивления;
- в – результат дифференцирования восстановленных значений удельного электрического сопротивления и расчета пространственного фильтра

Далее при помощи программы GEO-EM [Персова, 2011] рассчитаны электромагнитные отклики от среды без объекта с УЭС подсолевого комплекса (слой 9)  $\rho_1 = 23 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , в которую помещен относительно контрастный по геоэлектрическим свойствам проводящий объект (коллектор  $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) (Таблица 1.2). Далее проводилось восстановление УЭС данного горизонта по модельным кривым.

Таблица 1.2

Расчетные значения удельного электрического сопротивления, полученные в результате синтетического моделирования

$X$ , км	$X$ , м	$\rho_{\text{старт}}$	$\rho_{\text{итог}}$	$d_p$	$d_x$	$d_p/d_x$	$K_f$
-4000	500	23	23	0	500	0	0
-3500	1000	23	23	0	500	0	0
-3000	1500	23	23	0	500	0	0
-2500	2000	23	23	0	500	0	0
-2000	2500	23	23	1	500	0.002	0.31878
-1500	3000	23	22	2	500	0.004	0.63756
-1000	3500	23	20	3	500	0.006	0.956339
-500	4000	23	17	3	500	0.006	0.956339
0	4500	10	14	2	500	0.004	0.63756
500	5000	10	12	1	500	0.002	0.31878
1000	5500	10	11	1	500	0.002	0.31878
1500	6000	10	10	0	500	0	0
2000	6500	10	10	0	500	0	0
2500	7000	10	10	0	500	0	0

По мере удаления от границы смены параметров подсолевого комплекса результаты инверсии приближаются к модельным и УЭС слоя определяется все более точно.

В результате 1D-инверсии синтетических кривых определено, что геоэлектрические параметры целевого интервала восстанавливаются с незначительной ошибкой. График УЭС, определенных в результате инверсии, представляет собой результат сглаживания исходного графика УЭС модели и может быть представлен в виде свертки:

$$\log(\rho_{\text{итог}}) = \log(\rho_{\text{старт}}) * K_f, \quad (1.4)$$

где  $\rho_{\text{итог}}$ ,  $\rho_{\text{старт}}$  – сглаженное и исходное УЭС;  $K_f$  – коэффициент фильтра.

Коэффициенты весового фильтра легко получить дифференцированием графика результата инверсии. Ширина полученного в результате расчета фильтра пропорциональна радиусу влияния неоднородности и примерно равна удвоенной глубине расположения целевого горизонта. Середина фильтра соответствует границе смены сред, а его коэффициенты довольно точно аппроксимируются гауссовой функцией (Рис. 1.12б).

При площадной инверсии данных размерность уравнения (1.11) увеличивается и фильтр становится двумерным и осесимметричным. На основании этого предложена методика, отличающаяся от обычной «поточечной» одномерной инверсии. При подборе модифицируется общее значение УЭС слоя для всех кривых ЗСБ, входящих в радиус исследований. Функционал невязки рассчитывается при этом с использованием весовой функции  $W(R)$ :

$$W(R) = K_f = e^{-\frac{x^2}{R^2}}, \quad (1.5)$$

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

Общая формула функционала выглядит следующим образом:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}}, \quad (1.6)$$

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

### 1.2.8. Формирование параметрического функционала для инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей сред

На основании математического моделирования предложена методика, отличающаяся от обычной «поточечной» одномерной инверсии. При интерпретации данных ЗСБ, направленных на решение нефтегазопроисловых задач, изначально формируется упрощенный структурный каркас по данным МОГТ, который выступает в качестве стабилизирующего параметра. В качестве параметра регуляризации выступает типичная геоэлектрическая модель по данным априорной информации либо набор моделей [Матвеев, 1990].

Если модель среды задана в первом приближении, то решение обратной задачи ЗСБ проводится на основе минимизации параметрического функционала Тихонова:

$$M_a(\vec{\rho}) = I_{\log}(\vec{\rho}) + \alpha \Omega(\vec{\rho}) = \min. \quad (1.7)$$

Здесь  $\vec{\rho} = \vec{\rho}(h_1, \rho_1, h_2, \rho_2 \dots, \rho_N)$  – пространственный вектор, составленный из параметров геоэлектрического разреза [Матвеев, 1990].

Тогда функционал логарифмической невязки рассчитывается как:

$$\delta_{\log(\rho)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N k_i [\log(\rho_n^{pr}) - \log(\rho_n^{obs})]^2}{N - 1}}, \quad (1.8)$$

где  $k_i$  – весовой коэффициент.

В этом случае стабилизирующий функционал, роль которого заключается в ограничении интервала поиска, будет выглядеть как:

$$\Omega(\vec{\rho}) = \sqrt{\sum_{n=1}^N k_i [\log(\rho_n^{obs}) - \log(\rho_n^0)]^2 + k_j [h_n - h_n^0]^2}, \quad (1.9)$$

где  $\Omega(\vec{\rho})$  – стабилизирующий функционал, роль которого заключается в ограничении интервала поиска;  $\alpha$  – параметр регуляризации, контролирующий влияние стабилизатора;  $k_i, k_j$  – весовые коэффициенты, выражающие степень доверия параметрам опорной модели [Матвеев, 1990].

В случае решения нефтегазопоисковых задач структурный каркас закрепляется и не изменяется. При этом производится поточечная инверсия каждой кривой ЗСБ путем применения стандартных алгоритмов оптимизации обратной задачи при условии закрепления структурного каркаса. Автором предлагается проведение инверсии с применением пространственной невязки, которая аппроксимируется гауссовой функцией и позволяет учитывать соседние точки ЗСБ в процессе инверсии. Когда инверсия происходит с учетом соседних точек, УЭС в каждой точке определяется как средневзвешенное в рамках эффективного радиуса:

$$\Omega(\vec{\rho}) = \sqrt{\sum_{n-1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i^2 \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]^2}. \quad (1.10)$$

После формирования первичной геоэлектрической модели в случае влияния ВПИ [Антонов и др., 2013; Компаниец и др., 2019] или магнитной вязкости [Шарлов и др., 2021] производится их учет. После получения приближенной геоэлектрической модели с учетом ВПИ в рамках упрощенной модели происходит детализация структурного каркаса для подсолевой части разреза по данным площадной сейсморазведки МОГТ 3D и данным бурения скважин.

Поточечная инверсия при повышении детальности геоэлектрических разрезов приводит к появлению ложной дифференцированности геоэлектрических параметров по латерали, поэтому при переходе к изучению более тонких слоев необходима дополнительная стабилизация решения обратной задачи.

В случае применения подхода регуляризации и расчета пространственной невязки в параметрический функционал оптимизации будет выглядеть следующим образом:

$$F(\vec{\rho}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}} + \sum_{n-1}^N \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln \rho_i^2 \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]^2. \quad (1.11)$$

Поскольку ширина «зоны захвата» электромагнитного поля меняется в зависимости от глубины интерпретируемого слоя, значения сглаживающего фильтра рассчитываются для каждого из них. Понятно, что эффективность пространственного сглаживания зависит от количества точек, входящих в радиус исследования. При использовании высокочлотных сетей наблюдений сглаживание возрастает в квадрате по отношению к количеству точек на одной линии, что обеспечивает эффективность методики именно при инверсии данных ЗСБ 3D.

### 1.2.9. Апробация пространственного фильтра на синтетической модели

Для оценки эффективности методики использования пространственной невязки в ходе инверсии для типичных геологических условий юга Сибирской платформы проведе-

но синтетическое моделирование [Murzina et.al., 2020; Мурзина и др., 2022]. На модельной площади было размещено около 100 точек зондирования по плотной 3D-сети наблюдений. Далее проводился расчет кривых ЗСБ в программном обеспечении GEO-EM и восстановление в Model 4 [Емельянов и др., 2016]. На каждую теоретическую кривую, рассчитанную для типичной геоэлектрической модели (см. Таблицу 1.1), с включением неоднородности накладывался электромагнитный шум, характерный для исследуемой территории.

На Рис. 1.13 показана модель исследований и сеть наблюдений. На Рис. 1.14 – результат поточечной инверсии и инверсии с использованием пространственной невязки.

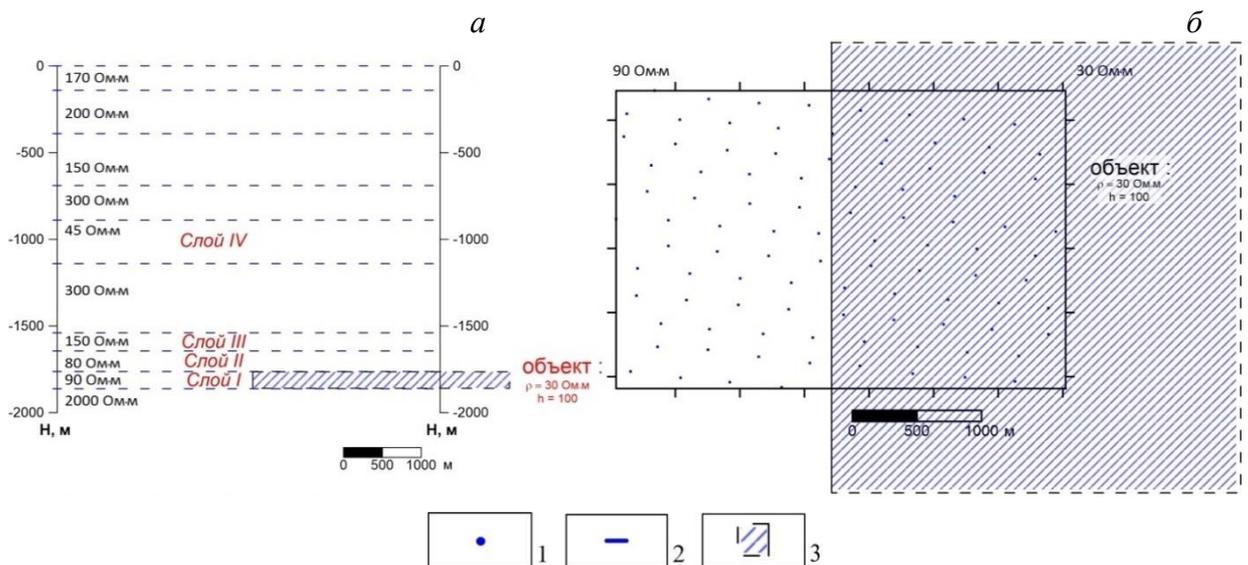


Рис. 1.13 – Схема математического моделирования:

а – в разрезе; б – в плоскости

- 1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне;
- 2 – границы геоэлектрических слоев; 3 – задаваемый объект

Проводящий слой IV восстанавливается достаточно устойчиво, в то время как горизонты, относящиеся к подсолевым отложениям и солевым отложениям. Таким образом, результаты синтетического моделирования показывают, что поточечная инверсия неизбежно приводит к формированию «пестрой» финальной модели за счет «переноса» погрешностей с кривых в разрез и детализации разреза (см. Рис. 1.14а<sub>I–aIII</sub>). Использование же пространственной невязки «распределяет» погрешности по всей совокупности кривых в радиусе исследований, что и формирует модель, гладкость которой соответствует эффективному разрешению электромагнитного поля на данной глубине, позволяя устойчиво и более точно восстановить модель (см. Рис. 1.14б<sub>I–бIII</sub>).

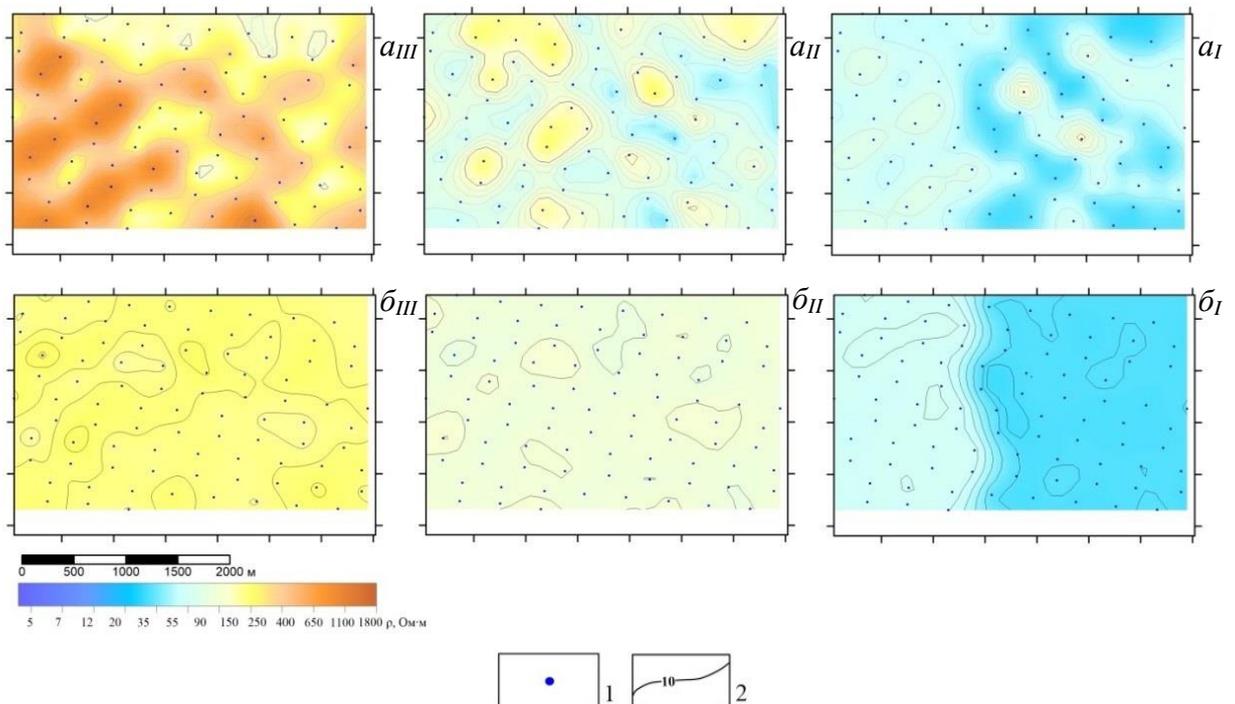


Рис. 1.14 – Результаты математического моделирования:

- а – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением поточечной инверсии; б – карта удельного электрического сопротивления, полученная с применением пространственной невязки  
 III – карта удельного электрического сопротивления отложений осинского и усть-кутского горизонтов,  $\epsilon$ ; II – карта удельного электрического сопротивления отложений собинской, тэтэрской свит,  $\epsilon_1$ ; I – карта удельного электрического сопротивления катангской, чорской свиты и коры выветривания,  $V-\epsilon_1$   
 1 – точки зондирования становлением поля в ближней зоне; 2 – изолинии удельного электрического сопротивления

### 1.2.10. Сравнение поточечной автоматической инверсии и инверсии с применением пространственного фильтра на практических данных для нижнего подгоризонта, объединяющего преображенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания

В первом и во втором случае отмечено, что полученные в результате решения обратной задачи невязки близки (Рис. 1.15б<sub>I</sub>,б<sub>II</sub>) и в большей степени связаны с качеством полевого материала в некоторых участках присутствия осложненных кривых ЗСБ (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 (Рис. 1.15а<sub>I</sub>,а<sub>II</sub>). Так, на карте УЭС (см. Рис. 1.15а<sub>I</sub>), полученной в результате применения поточечной инверсии, 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. 1.15а<sub>II</sub>). Прослеживается зональность геоэлектрических аномалий по площади. Единый подход к инверсии данных значительно снижа-

ет вероятность возникновения локальных «выбросов», которые наблюдаются при применении поточечной инверсии, позволяя уменьшить влияние дисперсии на поздних временах кривых ЗСБ на результат интерпретации [Murzina et.al., 2020; Мурзина и др., 2022б].

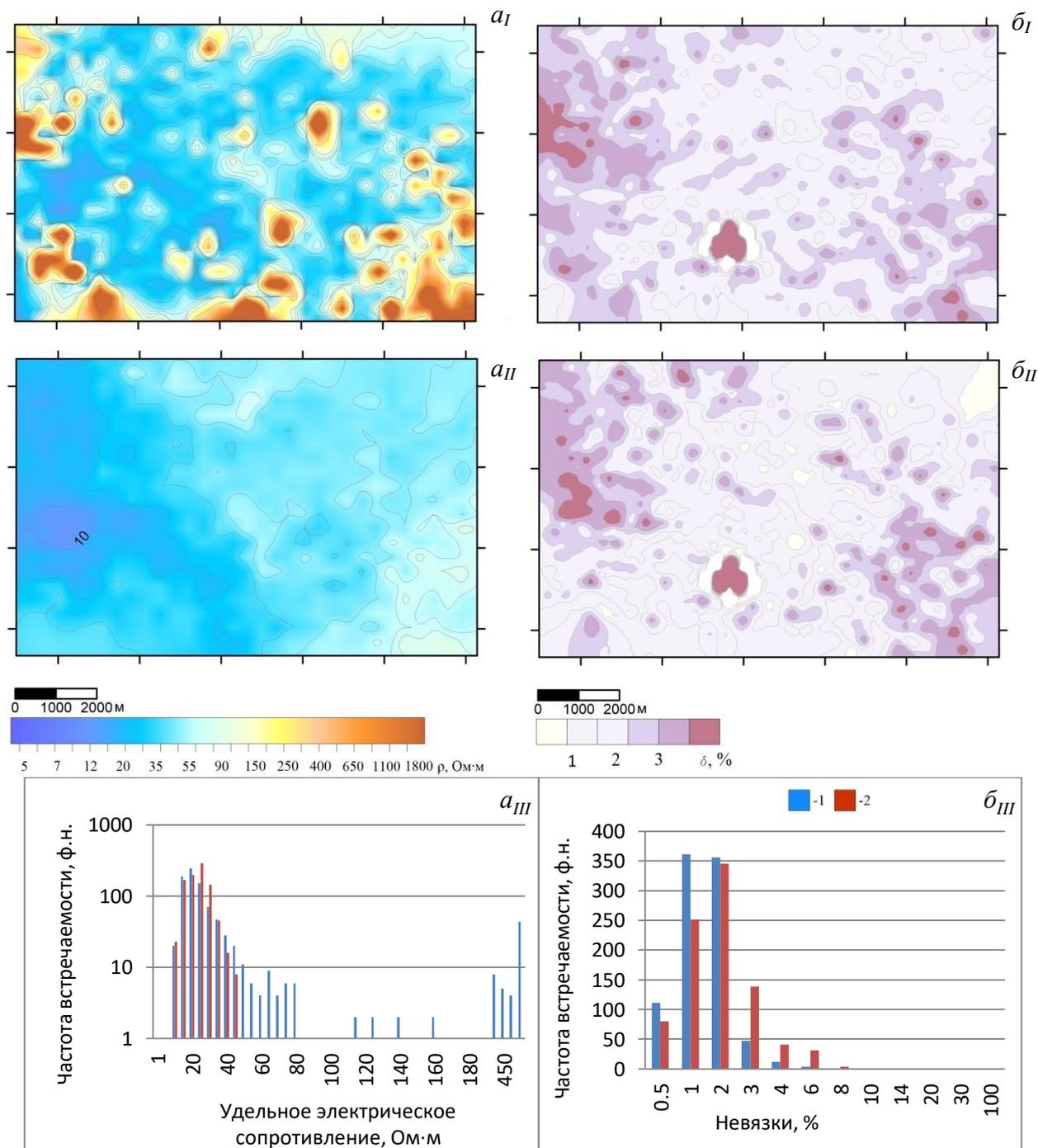


Рис. 1.15 – Результат поточечной инверсии и инверсии с применением пространственной невязки:

a<sub>I</sub>, a<sub>II</sub> – карты удельного электрического сопротивления и невязок поточечной инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне; a<sub>III</sub> – сравнение распределений удельного электрического сопротивления при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой; b<sub>I</sub>, b<sub>II</sub> – карты удельного электрического сопротивления и невязок инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки; b<sub>III</sub> – сравнение распределений невязок при поточечной инверсии и при инверсии с пространственной невязкой  
1 – поточечная инверсия; 2 – инверсия с применением пространственной невязки

Наглядно оценить и сравнить полученный результат позволяют диаграммы распределений УЭС и невязок (Рис. 1.15*а*<sub>III</sub>,*б*<sub>III</sub>). 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. 1.15*а*<sub>III</sub>,*б*<sub>III</sub>), становится более устойчивым и стремится к логнормальному закону распределения. В первом случае решение обратной задачи менее устойчиво [Murzina et.al., 2020; Мурзина и др., 2022*б*].

Проведение интерпретации с применением разработанной методики совместной инверсии соседних зондирований позволяет получить уверенный результат, который в дальнейшем может использоваться для составления прогнозных карт.

### 1.3. Выводы

В главе рассмотрены основные исторически сложившиеся подходы к интерпретации данных ЗСБ, методы регуляризации обратной задачи и существующие алгоритмы оптимизации, а также классы моделей, применяемые при решении нефтегазопроисковых задач.

В результате моделирования приводится характеристика, иллюстрирующая разрешающую способность 1D-инверсии, которая описывается гаусовой функцией и применяется при инверсии высокоплотных электромагнитных зондирований для регуляризации обратной задачи при инверсии кривых ЗСБ.

Показано, что применение функции пространственной невязки для инверсии кривых ЗСБ при интерпретации их детальными горизонтально-слоистыми моделями существенно повышает устойчивость ее решения.

## ГЛАВА 2. ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

При интерпретации большого объема данных ЗСБ чаще всего применяются 1D-инверсия данных ЗСБ с целью соответствия получаемой геоэлектрической модели геологическому строению. В данной главе в первом разделе предложены подходы к оценке качества инверсии, которые позволяют исключить вероятность сбоя работы аппарата автоматической инверсии, либо исключить ошибки интерпретации при недоучете магнитной вязкости или индукционно-вызванной поляризации. Также в случае решения нефтегазопоисковых задач важную роль играет точность определения УЭС в процессе инверсии, оценке которой при помощи стохастических алгоритмов интерпретации посвящён второй раздел данной главы.

### 2.1. Структура системы оценки качества инверсии данных ЗСБ

В качестве основного показателя оценки результата инверсии выступает среднеквадратическое расхождение практической и теоретической кривых – невязка. Тем не менее оценка невязки не дает полного представления о качестве решения обратной задачи в силу эквивалентности геоэлектрических параметров при работе с многослойными моделями. Важным критерием, позволяющим оценить полученный результат решения обратной задачи, может выступать выдержанность разреза по латерали и соответствие априорной информации физико-геологической модели. 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] и является неотъемлемой частью системы качества данных нестационарных электромагнитных зондирований (рис. 2.1).

Таким образом, основными критериями, позволяющими оценить качество инверсии, можно назвать:

- расхождение практической и теоретической кривой (невязку);
- определение латеральной выдержанности квазигоризонтально-слоистого разреза [Мурзина и др., 2017].

- определение соответствия полученной геоэлектрической модели априорной информации или типичной геоэлектрической модели.

При массовой интерпретации площадных данных полезно применение и других критериев качества, характеризующих качество полевого материала [Гусейнов, 2015]:

- степень осложненности систематической погрешностью ( $Ks, Df$ );
- степень осложненности кривой случайной погрешностью ( $E_m$ ).

Комплексная оценка результата решения ОЗ и качества полевого материала позволяет провести комплексный анализ и выявить причину искажения результата решения ОЗ.

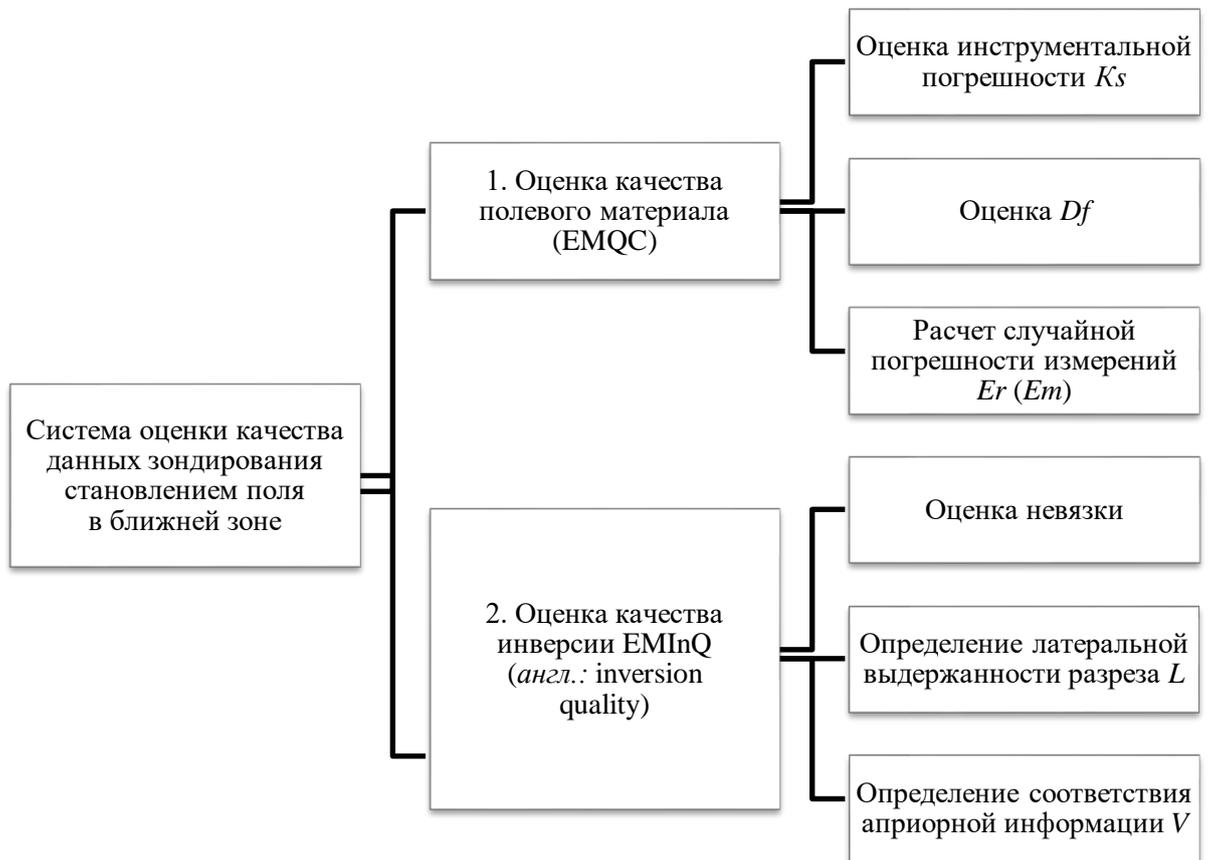


Рис. 2.1 – Блок-схема системы оценки качества данных зондирования становлением поля в ближней зоне

## 2.2. Оценка качества полевого материала EMQC

Существует ряд факторов, оказывающих влияние на качество полевого материала и, соответственно, на точность определяемых в процессе инверсии кривых ЗСБ геоэлектрических параметров. Это внешние шумы и собственные шумы измерительной системы, влияние трехмерных неоднородностей, а также присутствие частотно-зависимой дисперсии удельного сопротивления (ВПИ) или дисперсии магнитной проницаемости (эффект суперпарамагнетизма). Наличие этих факторов в условиях конкретного геоэлектрического разреза приводит к снижению точности решения обратной задачи.

Для получения качественных результатов полевых работ применяется подход, обеспечивающий комплексный анализ сигналов становления. Под качеством сигналов становления электромагнитного поля в соответствии с метрологической терминологией понимается совокупность точности и достоверности как степени влияния соответственно случайных и систематических помех, наложенных на индукционный отклик от геологической среды [Клевлеев и др., 2003]. Например, применяемое для супервайзинга программное обеспечение EMCONT (ООО «Северо-Запад») реализует такие критерии, как целостность, гладкость (путем расчета стандартного отклонения от сглаженной кривой ЭДС),

выход на кристаллический фундамент по трансформации кажущегося сопротивления, но не учитывает расхождение кривых, полученных от одного источника.

В целом критерии качества данных ЗСБ подразделяются на две группы: установленные инструкцией по электроразведке 1984 г. и применяемые в производстве и при супервайзерском контроле электромагнитных исследований [Гусейнов и др., 2015]. Способ оценки качества полевого материала ЗСБ, основанный на расчете комплексного показателя качества  $QC$ , встроен в программный модуль EMQC, разработанный на базе программного обеспечения SGS-TEM. Сущность данного способа заключается в расчете комплексного показателя, определяемого путем суммирования показателей случайной и систематической погрешности [Гусейнов и др., 2015]. Подход основан на технологии количественного контроля качества сейсморазведочных данных (SeisWin-QC). Комплексный коэффициент качества  $QC$  рассчитывается на основе показателей  $E_m$  и  $Ks$ .

Критерий  $E_m$  вычисляется в программном обеспечении TEM-Processing на этапе межсерийного суммирования (после выполнения интерполяции) и является показателем случайной погрешности (2.1):

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\delta(t_i)}{\Delta U(t_i)} 100\%, \quad (2.1)$$

где  $\delta(t_i)$  – среднеквадратическая погрешность величины ЭДС итоговой кривой на временном отчете  $t_i$ .

Одним из критериев оценки качества является расхождение сигналов становления на поздних временах, что более контрастно проявляется на трансформациях  $\rho_\tau(t)$  и  $S_\tau(H_\tau)$  [Гусейнов и др., 2015]. Для количественной оценки применяется процентное отклонение кажущейся проводимости от среднего значения:

$$Ks_i = \left| \frac{\overline{S(H_B)} - S_i(H_B)}{\overline{S(H_B)}} \right| 100\%, \quad (2.2)$$

где  $\overline{S(H_B)}$  – среднеарифметическое значение суммарной продольной проводимости (на глубине  $H_B$ ) для сигналов от одного источника электромагнитного поля.

Критерий  $Ks$  позволяет оценить суммарный вклад различных факторов:

- инструментальной ошибки;
- влияния неоднородностей геоэлектрического разреза;
- эффекта суперпарамагнетизма;
- влияния ВПИ;
- влияния случайных (природных, техногенных) погрешностей [Гусейнов, 2015].

Определить степень влияния ВПИ и эффекта суперпарамагнетизма на качественном уровне возможно с использованием критерия  $Df$  (модификация  $Ks$ ):

$$Df = \left| \frac{S(H_B) - S_{mean}}{S_{mean}} \right| 100\%, \quad (2.3)$$

где  $S(H_B)$  – значение суммарной продольной проводимости на глубине  $H_B$  по трансформации  $S_\tau(H_\tau)$ ;  $S_{mean}$  – среднее значение  $S(H_B)$  для разнесенных установок.

### 2.3. Оценка качества инверсии ЕМInQ

#### 2.3.1. Методика оценки погрешности решения обратной задачи

Как уже упоминалось ранее (см. гл. 1 § 1.1.4), невязка является количественной мерой различия между электромагнитным полем, рассчитанным для гипотетической модели, и реально наблюдаемым электромагнитным полем [Жданов, 2012]. Методы определения невязки также могут различаться. Существует несколько способов расчета невязки, в том числе с учетом применяемых весовых функций, направленных на регуляризацию результата решения обратной задачи [Oldenburg, 2005; Жданов, 2012; Тихонов, Арсенин, 1986].

Расчет невязки для оценки результата решения обратной задачи представляет собой среднюю относительную погрешность расхождения практической и теоретической кривой [Инструкция по электроразведке, 1984]. На практике невязка измеряет различия между теоретическими и наблюдаемыми данными и определяется как среднеквадратическое отклонение.

$$\delta(\text{ЭДС}) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\text{ЭДС}_n^{\text{teor}} - \text{ЭДС}_n^{\text{obs}})^2}{N}}, \quad (2.4)$$

где  $\text{ЭДС}_n^{\text{teor}}$  – теоретическое значение ЭДС для каждой точки  $n$ ;  $\text{ЭДС}_n^{\text{obs}}$  – наблюдаемое значение ЭДС для каждой точки  $n$ .

На практике обычно используется среднеквадратическая погрешность, которая измеряет различия между данными предсказанными  $\rho^{pr}$  и наблюдаемыми  $\rho^{obs}$  значениями кажущегося сопротивления [Жданов, 2012]. С учетом логарифмической шкалы представлению сопротивления формула невязки имеет следующий вид:

$$\delta_{\ln(\rho)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\ln(\rho_n^{pr}) - \ln(\rho_n^{obs}))^2}{N - 1}}. \quad (2.5)$$

Когда обратная задача уже решена, результативная невязка оптимальна и стремится к нулю ( $\delta \rightarrow \delta'$ ), она отражает не только качество подбора, но также и качество полевого материала. В связи с этим расчет невязки производится с учетом погрешности измерений  $\delta'$  [Oldenburg, 2005]. Тогда среднеквадратическая погрешность в логарифмической шкале будет выглядеть как:

$$\delta_{\ln(\rho)} = \sqrt{\delta_{\text{подбора}}^2 + \delta'^2}. \quad (2.6)$$

### 2.3.2. Методика расчета критерия латеральной выдержанности или контроль качества получаемой модели

Для предложенной оценки можно применить несколько подходов, направленных на определение отклонения УЭС единичной модели от среднего по латерали [Мурзина и др., 2017].

Более независимую оценку позволяет получить рассчитанное значение среднеквадратического отклонения, нормированное на среднее значение УЭС по выборке – коэффициент вариации  $V$ , который наглядно отражает резкую смену геоэлектрической модели, связанную с локальными единичными «выбросами» (Рис. 2.2). При расчете коэффициента вариации значениями резко выделяющимися из общей выборки будут считаться все более 1.

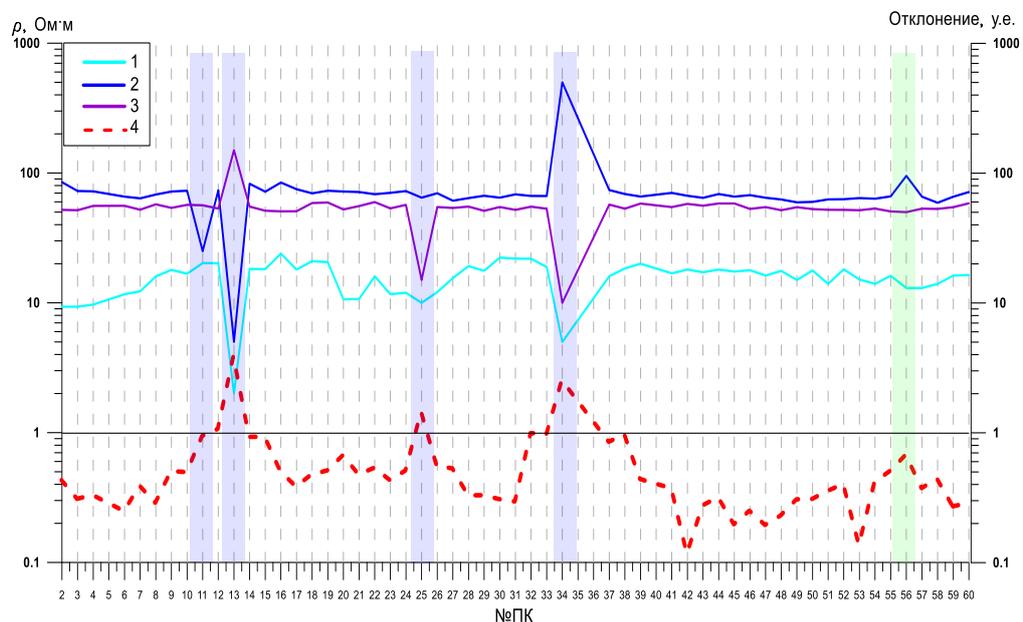


Рис. 2.2 – Графики удельного электрического сопротивления и коэффициента вариации: 1–3 – графики удельного электрического сопротивления; 4 – график отклонения удельного электрического сопротивления от типичной геоэлектрической модели

На практике применительно к плотным сетям наблюдений предлагается оценивать латеральную выдержанность  $L$  получаемых моделей как средневзвешенное геометрическое отклонение УЭС в радиусе  $R$  (см. главу 1.2.2.):

При расчете критерия латеральной выдержанности или отклонения УЭС в слое:

$$L = \ln \rho_L - \frac{\sum \ln \rho_i * g_i}{\sum g_i}, \quad (2.7)$$

где  $L$  – критерий отклонения УЭС от среднего по выборке;  $\rho_L$  – УЭС оцениваемого слоя;  $\rho_i$  – УЭС оцениваемого слоя;  $\frac{\sum \ln \rho_i * g_i}{\sum g_i}$  – средневзвешенное значение отклонения, определенное в зависимости от расстояния до точки, вес которой определяется заданием гауссовой функции, определенной ранее (см. главу 1.2.5.):

$$g_i = e^{-\frac{x^2}{R^2}}. \quad (2.8)$$

В результате оценок определена методика расчета отклонения УЭС и применения его к практическим данным:

– определяется отклонение УЭС в слое от средневзвешенного в выборке УЭС в пределах радиуса  $r$ ;

– в качестве оценок отклонения конкретного параметра от выборки применяется средневзвешенное в радиусе стандартное отклонение  $\sigma$ . Опыт решения обратных задач свидетельствует [Wisén et al, 2005], что в случае оптимального решения обратной задачи отклонение при помощи 1D инверсии  $\sigma \leq 1$ . Если  $\sigma \leq 1.5$  – это хорошее качество решения обратной задачи, если же  $\sigma \geq 2$ , задача не решена и, вероятно, не может быть решена в рамках 1D-инверсии.

Оценить выдержанность моделей в разрезе возможно путем определения отклонения геоэлектрической модели в каждой точке зондирования от типичной геоэлектрической модели (Рис. 2.3). Под типичной геоэлектрической моделью понимается осредненная по площади геоэлектрическая модель или модель, построенная путем осреднения проводимости каждого геоэлектрического комплекса по данным бокового каротажа или имеющейся априорной информации. Данная оценка отражает нетипичность геоэлектрической модели.

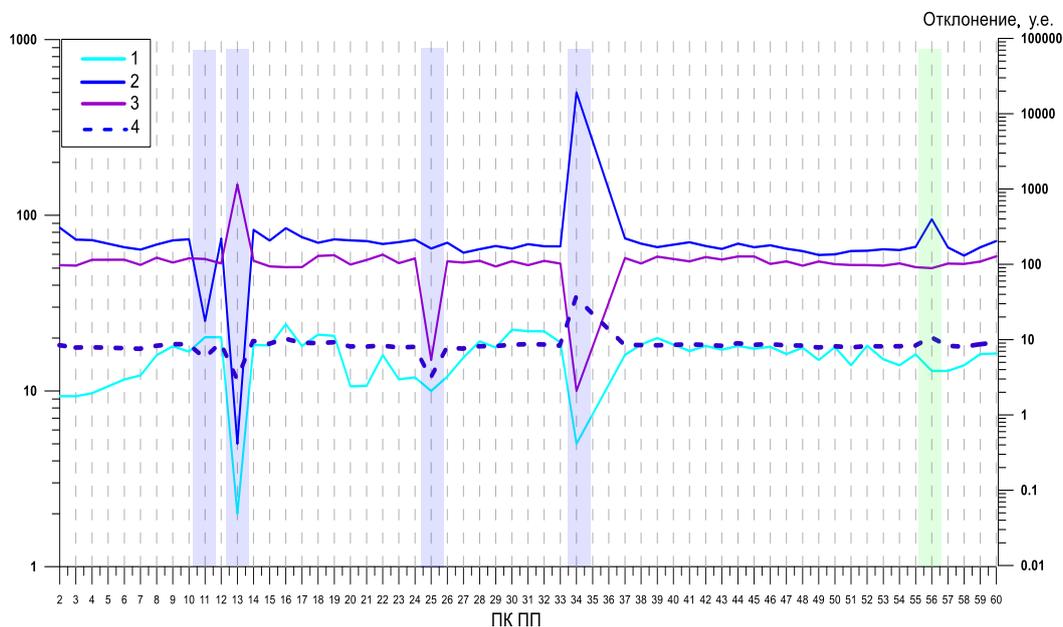


Рис. 2.3 – Пример оценки отклонения удельного электрического сопротивления от среднего по выборке в виде графиков:  
1–3 – графики удельного электрического сопротивления; 4 – график отклонения удельного электрического сопротивления от типичной геоэлектрической модели

Модельные данные сравниваются с априорной информацией. Определяется соответствие распределения УЭС в слоях. Например:  $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \rho_3 \dots \geq \rho_n$ , где  $\rho_1 \dots \rho_n$  – УЭС с номерами слоев модели (в случае соответствия ставится оценка 1, в случае несоответ-

ствия – 0.8). Суммарная оценка по всем слоям, полученная в каждой точке зондирования, дает представление о соответствии модели каждого пикета существующей априорной информации.

Предложенные оценки дают представление как о результате решения обратной задачи, так и о наличии неоднородностей в разрезе. Суммирование данных критериев с другими видами оценки или их комплексный анализ позволяет получить представление о причине некачественного или неприемлемого результата решения обратной задачи. Чем больше будет суммарная оценка по слоям, тем хуже решена обратная задача.

### 2.3.3. 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  $\delta$  – невязка;  $L$  – латеральная выдержанность разреза или соответствие модели априорной информации [Мурзина и др., 2017].

Комплексный коэффициент качества инверсии ( $InQ$  – inversion quality) рассчитывается следующим образом:

$$InQ(\delta) = \begin{cases} 1, & \delta \leq 2 \\ 0.95, & 2 < \delta < 5 \\ 0.9, & 5 < \delta < 10 \\ 0.8, & \delta > 10 \% \end{cases}; \quad (2.9)$$

$$InQ(L) = \begin{cases} 1, & 0.95, L \leq 0.5 \\ 0.9, & L \leq 1 \\ 0.8, & 1 < L < 2 \end{cases}; \quad (2.10)$$

$$InQ = \begin{cases} \min(InQ(\delta), InQ(L)), & K_I = 1 \\ 0, & K_I = 0 \end{cases}. \quad (2.11)$$

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

### 2.3.4. Подход к комплексной оценке качества инверсии и качества полевого материала данных площадного зондирования становлением поля в ближней зоне

Комплексная оценка погрешности решения обратной задачи  $\delta$ , критерия латеральной гладкости  $L$  и параметра  $Ks$  ( $Df$ ). В случае, когда инверсия данных ЗСБ, осложненных влиянием ВПИ осуществляется без учета ВПИ результатом инверсии данных ЗСБ будут нереалистичные модели сред [Кожевников, Антонов, 2009]. Достоверность задания параметров поляризации при инверсии кривых является важным этапом, влияющим на корректность определения сопротивлений [Антонов и др., 2013; Компаниец и др., 2013, 2019]. Оценка относительной погрешности  $\delta$  и расхождения кривых в установке  $Ks$  позволяет выделить из большого объема данных кривые с высокими значениями невязки,

осложненные эффектами отклонения среды от одномерной модели. При этом оценка латеральной выдержанности  $L$  совместно с критерием  $Df$  позволяет оценить правильность учета ВПИ. В случае, когда оценки  $Ks$  завышены и  $L$  не соответствует выдержанному разрезу, необходимо выполнить учет ВПИ в соответствии с известными алгоритмами его учета [Кожевников, Антонов, 2009].

*Комплексная оценка относительной погрешности  $\delta$  и суммарной погрешности измерения кривой  $E_t$ .* Оценка погрешности результата инверсии и дисперсии сигнала позволяет выделить из большого набора данных кривые с высоким уровнем электромагнитных помех, ухудшающих невязки. Нормировка невязки на качество полевой кривой позволяет исключить из оценки результата инверсии качество полевого материала или влияние шума.

*Оценка качества инверсии  $InQ$  и качества полевого материала  $QC$ .* При оценке всех параметров совместно путем построения корреляционных зависимостей или графиков существует возможность сделать вывод об объективности и надежности полученного результата инверсии и выявить причину осложнения процесса инверсии.

#### **2.4. Подход к оценке ошибки определения удельного электрического сопротивления статистическими методами**

Любой результат инверсии находится в окрестности истинных (искомых) значений. Производя инверсию от разных стартовых приближений (для детерминированных алгоритмов поиска), либо многократно повторяя (для стохастических алгоритмов), можно получить семейство решений. Решения, при сопоставимой невязке, являются равновероятными и находятся на равном расстоянии от искомого (в пределах одной окрестности при разной невязке). Поэтому получаемое в процессе инверсии семейство решений анализируется в виде оценок разброса, частотного распределения значений и средних (арифметическое, геометрическое, гармоническое, квадратическое и пр.) [Мурзина, 2018]. Исходя из полученной информации о распределении, формируется заключение о характере окрестности и выбирается метод осреднения выборки. Помимо этого, используется информация о невязках. Каждое решение из набора имеет свою собственную оценку близости к истине (искомым значениям) – расхождение между синтетическим и полевым сигналом. Невязка используется в качестве веса при вычислении среднего по семейству.

При работе с синтетическими данными, когда известна геоэлектрическая модель нижнего полупространства, а практические кривые ЗСБ синтезированы от неё, есть возможность сравнить результат инверсии с исходными значениями. Апробирование алгоритмов инверсии на таких данных позволяет, к примеру, установить зависимость точности восстановления от уровня зашумления сигналов [Емельянов, 2016]. Однако, при работе с полевыми данными оценка точности таким способом (за неимением истинных моделей

для сравнения) не представляется возможной. К тому же существует ряд факторов, оказывающих влияние на качество полевого материала и, соответственно, на точность определяемых в процессе инверсии кривых ЗСБ геоэлектрических параметров: внешние и собственные шумы измерительной системы, влияние трехмерных неоднородностей; присутствие влияния ВПИ и СПМ [Гусейнов, 2015]. Наличие этих факторов в условиях конкретного геоэлектрического контраста разреза приводит к снижению точности оценки его параметров. В этой связи необходима разработка подхода, позволяющего производить оценку ошибки определения УЭС целевых интервалов.

#### **2.4.1. О методе Монте-Карло**

Метод Монте-Карло с элементами имитации отжига [Лопатин, 2005] основан на получении большого числа реализаций стохастического (случайного) процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи. Минимизируемый функционал метода отжига – энергия остывающего тела. При медленном отжиге тепловое равновесие достигается при каждом значении «температуры», и энергия тела, соответствующая этой температуре, будет минимальной, то есть, плавно понижая температуру, можно достичь глобального минимума энергии. Если охлаждение проводится недостаточно медленно, то в кристалле образуются дефекты и состояние системы оказывается метастабильным – она попадает в один из локальных энергетических минимумов. Метод Монте-Карло часто используется для имитации процессов, происходящих в природе или для исследования ошибки определения тех иных параметров объектов исследования, изучаемых посредством моделирования процессов при описании реальных моделей сред.

В качестве примера приведен способ оценки качества модели, полученной в результате сейсмической инверсии данных МОГТ (Рис. 2.4). Для оценки ошибки определения положения отражающих границ используется накопление статистики методом Монте-Карло [Алешин, 2012].

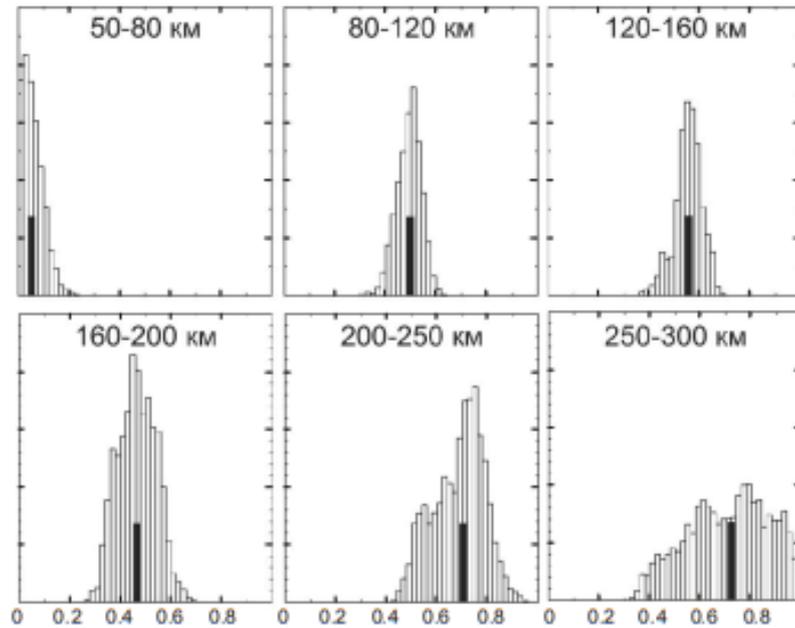


Рис. 2.4 – Пример применения метода Монте-Карло для оценки качества модели, полученной в результате сейсмической инверсии путем оценки среднеквадратического отклонения [Алешин, 2012]

Проблемы, связанные с этим методом, состоят в выборе алгоритма, генерирующего случайные модели, и в выборе скорости понижения «температуры». Медленное понижение температуры позволяет найти глобальный минимум, но требует больших затрат времени счета. Если снижать температуру очень быстро, мы можем попасть в один из локальных минимумов. Все существующие модификации метода симуляции отжига различаются этими алгоритмами.

Основной недостаток метода Монте-Карло заключается в оценке погрешности, точнее, в ее определении [Жданов и др., 2005]. Погрешность в определении искомой величины методом Монте-Карло обозначается статистической погрешностью, которую можно записать как:

$$\delta = \frac{C}{\sqrt{N}}. \quad (2.12)$$

Из этой формулы следует, что число испытаний  $N$  должно быть достаточно большим. Сложность в определении погрешности вычисления методом Монте-Карло состоит в определении коэффициента  $C$  в числителе. Во многих задачах применение аналитических методов позволяет определить и уменьшить значение коэффициента  $C$ . В этом случае использование метода Монте-Карло позволяет получить не только количественные характеристики, но и необходимые качественные закономерности.

Еще один недостаток данного метода связан с необходимостью проведения однотипных расчетов для нескольких серий экспериментов на электронно-вычислительных машинах, количество которых зависит от количества испытаний  $N_1 \cdot N_2$ , где  $N_1$  – количество испытаний для одной серии;  $N_2$  – количество серий экспериментов. Этот недостаток

фактически связан с быстродействием современных вычислительных машин [Жданов и др., 2005].

Отметим несколько правил, которые необходимо учитывать при построении алгоритмов методом Монте-Карло:

- алгоритм и программа должны быть организованы так, чтобы все точки искомой зависимости вычислялись параллельно и одновременно, а не последовательно;
- в программе вычисления методом Монте-Карло должна быть приведена процедура, которая проводит и выводит оценку погрешности метода;
- при проведении нескольких серий экспериментов мы получаем разные оценки ожидаемой, то есть определяемой величины – необходимо разработать процедуру проведения оценки, значений смещения определяемой величины;
- результаты метода статистических испытаний могут в значительной степени зависеть от количества испытаний, поэтому статистика должна быть достаточной, чтобы время усреднения было больше времени релаксации – в этом случае можно использовать асимптотику, то есть применение центральной предельной теоремы, на основе которой можно получить надежную оценку погрешности и доверительные интервалы;
- результаты вычислений не должны зависеть от особенностей метода (например, иного датчика случайных чисел, другого алгоритма, схемы генерирования новой конфигурации и т. д.). Малое изменение каких-либо параметров не должно приводить к существенному изменению результатов [Жданов и др., 2005].

#### **2.4.2. Методика оценки ошибки определения удельного электрического сопротивления**

Инверсия осуществляется с применением стохастического метода – метода Монте-Карло [Лопатин, 2005]. Инверсия каждой кривой ЗСБ выполняется за несколько циклов – шагов спуска, количество которых может достигать многие десятки [Емельянов и др., 2016; Мурзина и др., 2018]. Каждый цикл – это генерация множества случайных геоэлектрических моделей со значениями сопротивлений слоев в некотором доверительном диапазоне УЭС, который формируется на каждой итерации решения обратной задачи и сужается с каждым последующим циклом. При применении данного подхода для инверсии данных ЗСБ на каждой последующей итерации инверсии происходит понижение «температуры» по невязке и сужение окна анализируемой выборки значений УЭС (Рис. 2.5).

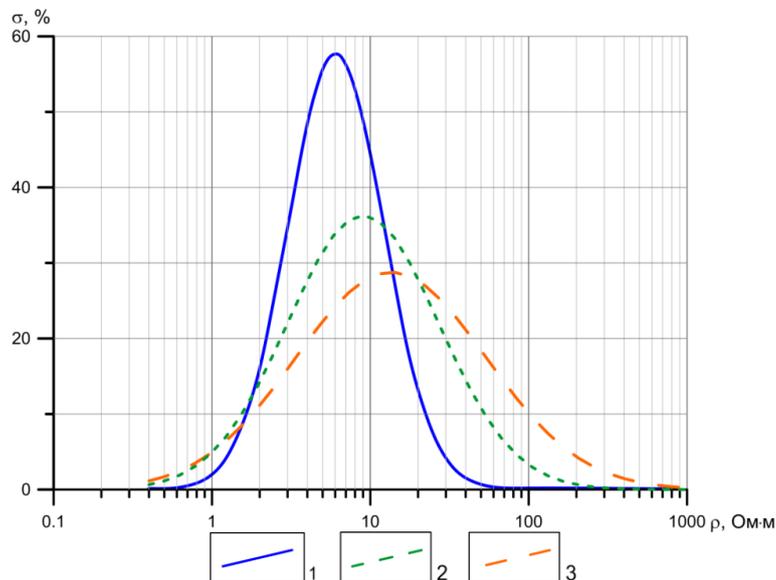


Рис. 2.5 – Распределения удельного электрического сопротивления при сужении доверительного диапазона в процессе инверсии:  
1 – шаг инверсии № 3; 2 – шаг инверсии № 2; 3 – шаг инверсии № 1

В случае, когда проведено достаточное количество накоплений, оценка ошибки проводится путем анализа распределения УЭС на последней итерации цикла инверсии. На основе усеченной выборки (набор моделей с наименьшими невязками) полагается, что среднегеометрическая оценка УЭС для каждого слоя есть наилучшее приближение модели к исходной модели. В свою очередь мера его ошибки искомого параметра в рамках выбранной модели есть среднеквадратическое расхождение. Для каждого последующего шага инверсии на основании вычисленной невязки формируется новый доверительный диапазон – как правило,  $\pm 1.96\sigma$  (Рис. 2.6).

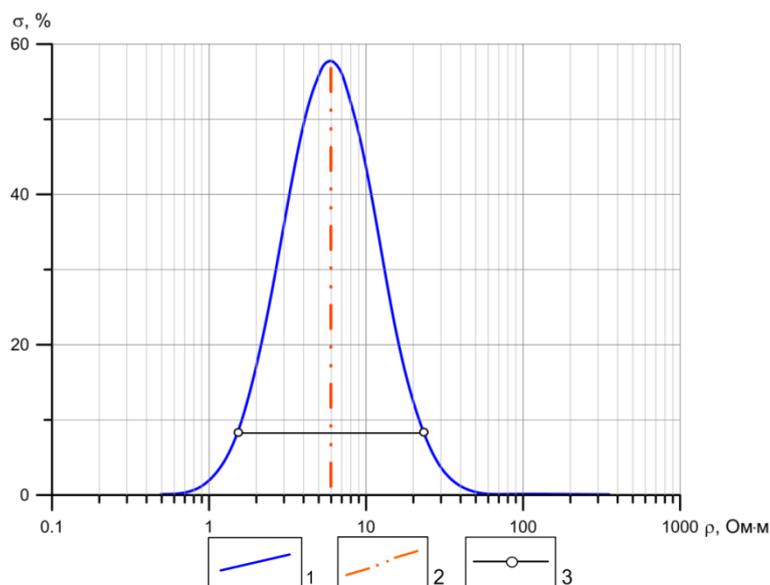


Рис. 2.6 – Анализ распределения удельного электрического сопротивления завершающей итерации инверсии:  
1 – шаг инверсии № 3; 2 – среднее значение выборки; 3 – область 95 % решений ( $\pm 1.96\sigma$ )

При условии уменьшения среднеквадратического отклонения  $\sigma$  во время инверсии и достаточного количества шагов спуска (задавалось по 10 шагов спуска и по 100 итера-

ций для каждого шага в каждой точке зондирования) последняя итерация описывает погрешность решения обратной задачи. Для перехода от коэффициента вариации к ошибке определения УЭС предлагается последовательность, представленная на Рис. 2.7.

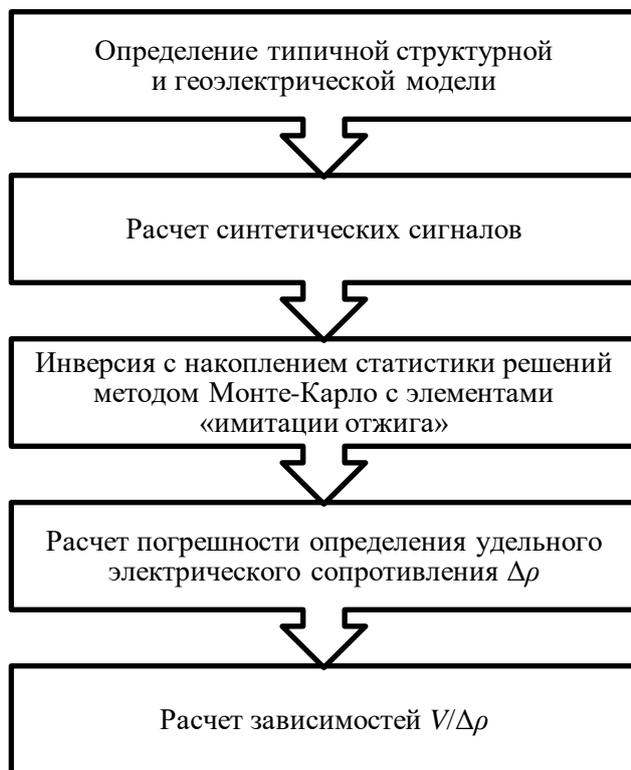


Рис. 2.7 – Схема последовательности расчета ошибки определения удельного электрического сопротивления горизонта-коллектора

Для анализа полученного результата проводилось сравнение коэффициента вариации и относительного отклонения восстановленного УЭС слоя от исходного значения УЭС.

Коэффициент вариации представляет собой отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению измеряемого параметра и позволяет проводить более независимую оценку полученного результата (2.15):

$$V = \frac{\sigma}{\bar{\rho}} \cdot 100 \%, \quad (2.13)$$

где  $V$  – коэффициент вариации геоэлектрического параметра (погрешность), %;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;  $\bar{\rho}$  – среднее значение УЭС по выборке.

#### 2.4.3. Обоснование подхода к расчету ошибки удельного электрического сопротивления при инверсии

Для оценки возможности применения метода Монте-Карло с элементами «имитации отжига» проводилось предварительное моделирование. Для решения прямой задачи использовалась программа Model 4 [Емельянов и др., 2016]. От генерализованной геоэлек-

трической модели юга Сибирской платформы (Рис. 2.8б) проведен расчет сигналов становления для установок (Qq, Q-q) с разносами 0, 0.5 и 1 км.

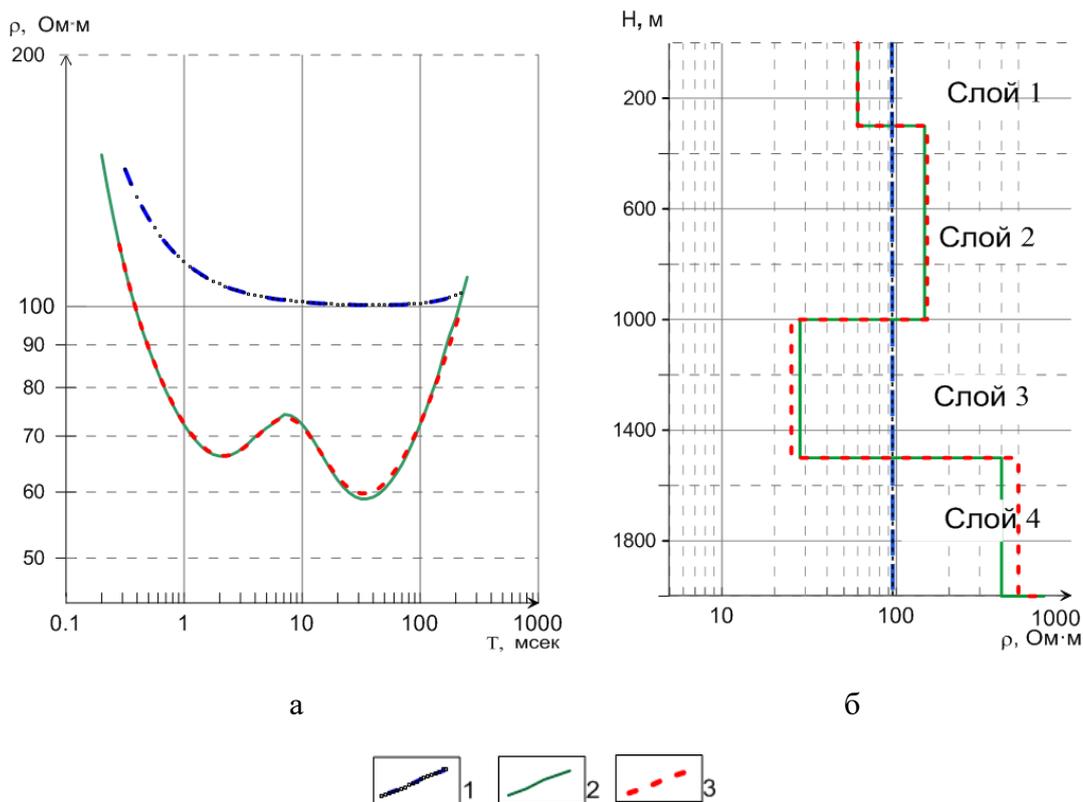


Рис. 2.8 – Модельные кривые зондирования становлением поля в ближней зоне:  
 а – трансформанта кажущегося сопротивления  $\rho_\tau(t)$ ; б – геоэлектрическая модель  
 1 – стартовая кривая зондирования становлением поля в ближней зоне; 2 – теоретическая  
 кривая зондирования становлением поля в ближней зоне; 3 – практическая кривая  
 зондирования становлением поля в ближней зоне

Сопротивления слоев модели составляли 60, 150, 26, 500  $\Omega \cdot m$  (Рис. 2.8). Мощности каждого слоя – 600 м. От выбранной модели создано 100 кривых зондирования. Последний слой – фундамент. На старт инверсии подавалась модель с единым, средним, значением сопротивления в 100  $\Omega \cdot m$ . При инверсии четырехслойной модели не требуется дополнительного задания условий регуляризации, так как восстановление УЭС происходит стабильно. При достижении оптимальной невязки инверсия завершалась. Для анализа полученного результата проводилось сравнение коэффициента вариации  $V$ , %, и рассчитанного отклонения восстановленного УЭС слоя от исходного значения УЭС.

Для перехода от коэффициента вариации к ошибке определения УЭС предлагается последовательность, представленная на Рис. 2.7. Коэффициент корреляции между определенным в результате инверсии коэффициентом вариации  $V$  и ошибкой  $\Delta\rho$  восстановления УЭС составляет 0.8, 0.9 (Рис. 2.9). Таким образом, оценив коэффициент вариации  $V$ , возможно определить ошибку инверсии  $\Delta\rho$ .

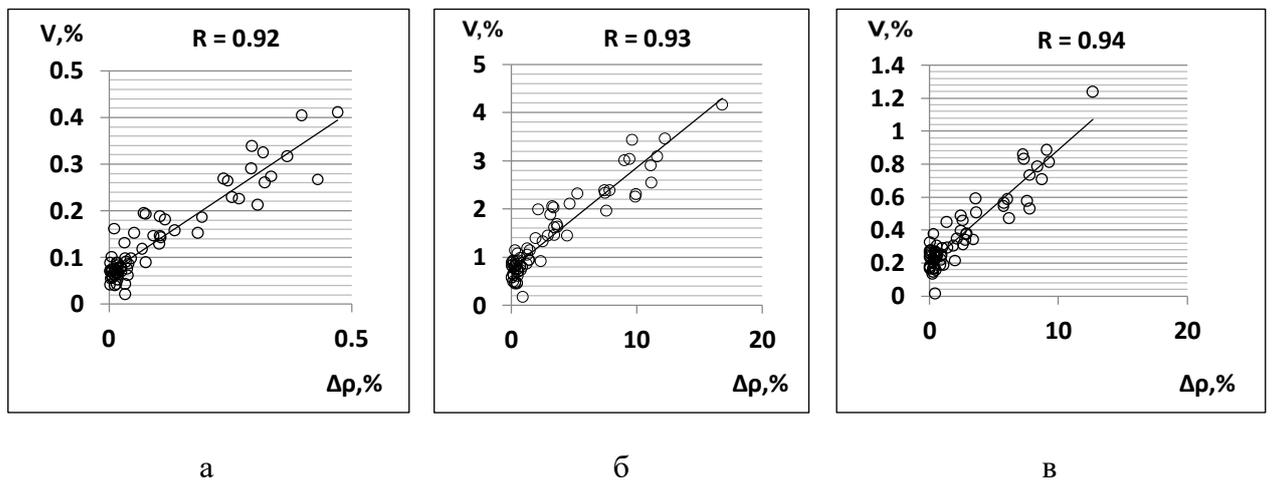


Рис. 2.9 – Диаграммы связи коэффициента вариации и ошибки инверсии по данным синтетического моделирования:

а – выборка первого слоя, б – выборка второго слоя, в – выборка третьего слоя

В результате проведенного моделирования с применением статистических алгоритмов инверсии сделано несколько весомых выводов:

- ошибка определения УЭС слоя возрастает с увеличением размерности измеренной величины;

- с глубиной погрешность определения УЭС возрастает, но для более проводящих объектов она значительно меньше;

- наличие прямой зависимости между погрешностью определения сопротивления  $\Delta\rho$  и коэффициентом вариации  $V$ , получаемым в процессе инверсии кривых ЗСБ, позволяет использовать последний в качестве инструмента оценки ошибки определения УЭС слоя [Мурзина и др., 2018].

#### 2.4.4. Подход к оценке чувствительности метода ЗСБ при изучении детальных моделей сред путем синтетического моделирования

Высокое качество современных электромагнитных зондирований и комплексный подход к интерпретации (привлечение данных сейсморазведки) дают возможность детального разделения осадочного чехла. При попытке деления геоэлектрического разреза на большее количество слоев неизбежно возрастает неопределенность результатов решения обратной задачи. Повышенные же требования к определению геоэлектрических свойств горизонтов-коллекторов, в свою очередь, на этапе прогнозирования насыщения перспективных горизонтов влекут за собой необходимость оценки достоверности получаемого результата интерпретации данных ЗСБ.

Оценить устойчивость решения обратной задачи и чувствительность метода ЗСБ к изучению геоэлектрических параметров возможно на основании анализа статистических параметров, получаемых при решении обратной задачи. Естественно, что при определении того или иного типа насыщения коллектора по данным ЗСБ основополагающим явля-

ется вклад проводимости целевого интервала  $S_{ци}$  [Буддо, 2012] по продольной проводимости относительно вышележащей  $S_{вл}$  толщи –  $S_{ци}/S_{вл}$ . Указанный параметр является мерой «проявленности» целевого интервала на кривой становления, и его величина играет важную роль, позволяя еще до решения обратной задачи судить о возможности или невозможности надежного определения параметров целевого интервала. Оценить возможность решения обратной задачи на этапе разделения насыщения того или иного геоэлектрического интервала в квазигоризонтально-слоистых средах позволяет также оценка расхождения между сигналами, сформированными от разных геологических моделей насыщения.

Оценить стабильность решения обратной задачи для тех или иных геоэлектрических условий возможно путем анализа выборок УЭС, получаемых посредством инверсии переходных характеристик статистическими алгоритмами. Разброс значений УЭС (узость гистограмм оценок УЭС целевого интервала) – по данным инверсии массива синтетических сигналов становления, отличающихся наложенными реализациями шума, по отношению к границам «интервала поиска», задаваемым в процессе инверсии. Границы интервала поиска задаются исходя из априорных представлений о значениях УЭС целевого интервала (данный подход применим не только к целевому интервалу, а ко всем слоям геоэлектрической модели).

Учитывая логнормальный характер распределений оценок УЭС [Дэвис, 1990], в качестве меры устойчивости решения обратной задачи можно использовать логнормальный закон распределения УЭС, приближающего (пересчитанную в среднеквадратическое расхождение) гистограмму набора оценок, нормированную на ширину «интервала поиска». Таким образом, дисперсия выборки УЭС целевого интервала по отношению к границам «интервала поиска» представляет собой соотношение  $\frac{\sigma_{ци}}{\Delta\rho_{ци}}$ , в котором  $\sigma_{ци}$  – дисперсия значений в результате восстановления;  $\Delta\rho_{ци}$  – исходный диапазон поиска или разница между минимальным и максимальным диапазонами поиска. Границы интервала поиска также задаются исходя из априорных представлений о значениях УЭС целевого интервала (применимо не только к целевому интервалу, а ко всем слоям геоэлектрической модели).

Разность значений УЭС двух моделей (при разном типе насыщения целевых интервалов) относительно ширины «интервала поиска» выглядит как  $\left(\frac{\rho_n - \rho_b}{\Delta\rho_{ци}}\right)$ , где  $\rho_n$  и  $\rho_b$  – УЭС целевого интервала в моделях при различном насыщении;  $\Delta\rho_{ци}$  – исходный диапазон поиска. Эта величина показывает, насколько контрастными являются геоэлектрические модели, отвечающие различному типу насыщения, на фоне возможных вариаций УЭС целевого интервала по априорным данным.

Если  $\frac{\sigma_{\rho_{ци}}}{\Delta\rho_{ци}} \rightarrow 0$ , а  $\left(\frac{\rho_n - \rho_v}{\Delta\rho_{ци}}\right) \rightarrow 1$ , решение обратной задачи является устойчивым и чувствительность метода считается достаточной для разделения моделей по насыщению.

В качестве примера в табл. 2.1 и 2.2 представлен результат расчета, в котором видно, что для представленной модели решение обратной задачи является устойчивым.

Таблица 2.1

Граничные уровни удельного электрического сопротивления целевого интервала для разных насыщений интервала  $T_1$

	$\rho_{ист}$	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	$Ln \rho_{min}$	$Ln \rho_{max}$
$M_1$	13.5	6.75	27	1.9	3.29
$M_2$	7.4	3.7	14.8	1.3	2.69
$M_3$	4.7	2.35	9.4	0.85	2.24

Таблица 2.2

Оценка устойчивости решения обратной задачи при определении коллекторских свойств целевого интервала

	$M_1$	$M_2$	$M_3$
$\rho_{ист}$	7.4	13.5	4.7
	2	2.6	1.55
Среднее	7.4	13.51	4.762
Стандартная ошибка	0.01	0.03	0.002
Медиана	7.42	13.51	4.762
Стандартное отклонение	0.06	0.25	0.022
Дисперсия выборки	0.01	0.06	0.001
Экссесс	3.74	10.24	1.7
Асимметричность	0.74	1.62	-0.2
Интервал	0.45	2.03	0.138
Минимум	7.26	12.88	4.699
Максимум	7.7	14.94	4.83
Сумма	742.1	1351.91	476.09
Счет	100	100	100
Уровень надежности (95 %)	0.013	0.049	0.004
$\sigma_{\rho_{ци}}$	0.0041	0.061	0.001
$\Delta\rho_{ци}$	20.25	11.1	7.05
$\sigma_{\rho_{ци}} / \Delta\rho_{ци}$	0	0.01	0
$(\rho_n - \rho_v) / \Delta\rho$	0.43	0.24	0.38

Примечание. Курсивом в таблице выделено  $\sigma_{\rho_{ци}}$  – дисперсия значений в результате восстановления;  $\Delta\rho_{ци}$  – исходный диапазон поиска;  $\sigma_{\rho_{ци}} / \Delta\rho_{ци}$  – дисперсия выборки УЭС целевого интервала по отношению к границам «интервала поиска»;  $\left(\frac{\rho_n - \rho_v}{\Delta\rho_{ци}}\right)$  – разность значений УЭС двух моделей (при разном типе насыщения целевых интервалов) относительно ширины «интервала поиска».

Из приведенных примеров видно, что все вышеуказанные величины являются относительными и должны сопоставляться с «нормирующим фактором» (уровень шумов / уровень проводимости вышележащей толщи / ширина «интервала поиска»), представляющим собой другую неотъемлемую часть априорной информации, необходимой для достаточно надежной оценки успешности применения ЗСБ на том или ином объекте, а также в тех или иных геоэлектрических условиях.

## 2.5. Выводы

В главе рассмотрены основные исторически сложившиеся подходы оценки качества инверсии (невязка), являющиеся некоторой условной мерой соответствия результативной модели истинной.

Введено понятие «латеральной выдержанности» разреза, предложена численная мера ее оценки. Представлен подход оценки качества инверсии данных ЗСБ.

В результате моделирования при помощи стохастических алгоритмов инверсии разработан подход, позволяющий оценить количественную ошибку определения УЭС горизонта-коллектора. Разработаны методические рекомендации для оценки ошибки определения УЭС в ходе инверсии методом Монте-Карло с элементами «имитации отжига».

### ГЛАВА 3. ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕВЯЗКИ НА ПРИМЕРЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НЕПСКО-БОТУОБИНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

В главе приводятся результаты интерпретации материалов 3D ЗСБ на территории юга Непско-Ботуобинской антеклизы с применением пространственного фильтра при инверсии данных электромагнитных зондирований. Показаны подходы оценки качества данных ЗСБ и пример выбора оптимального результата интерпретации на основе представленных оценок. На примере первого объекта рассмотрен пример оценки результата инверсии

#### 3.1. Геолого-тектоническое строение объектов исследований

Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция расположена в западной части республики Саха (Якутия), в северном и центральном районах Красноярского края, в западном и северном районах Иркутской области. Общая площадь ее составляет около 2640 тыс. км<sup>2</sup>. В качестве типичных примеров рассмотрены участки, находящиеся в пределах Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области, входящей в состав Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (Рис. 3.1).

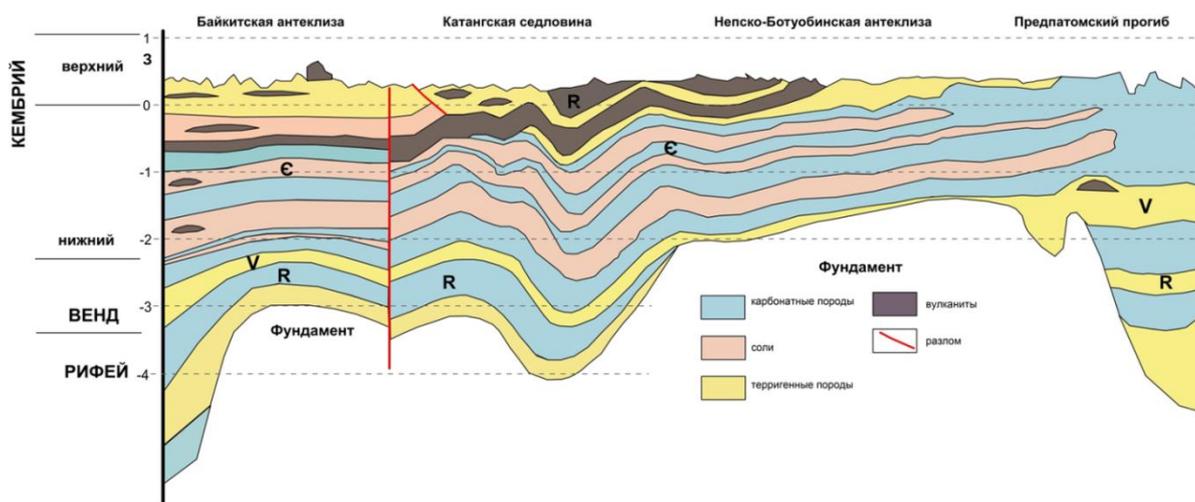


Рис. 3.1 – Схематический геологический разрез тектонических структур юга Сибирской платформы

Непско-Ботуобинская антеклиза с юга ограничена Ангаро-Ленской ступенью (Рис. 3.2) [Конторович и др., 1975, Конторович, 2008], с востока – глубоким Прибайкальским прогибом северо-восточного простирания, отделяющим антеклизу от Байкало-Патомской горно-складчатой области. На западе Катангской седловиной и Байкитской антеклизой. Непско-Ботуобинская антеклиза, выделяемая по данным геофизики и материалам глубокого бурения, имеет северо-восточное простирание. В пределах Непско-Ботуобинской ан-

теклизы в осадочной толще довольно отчетливо выделяется три структурно-литологических комплекса: подсолевой, солевой и надсолевой.

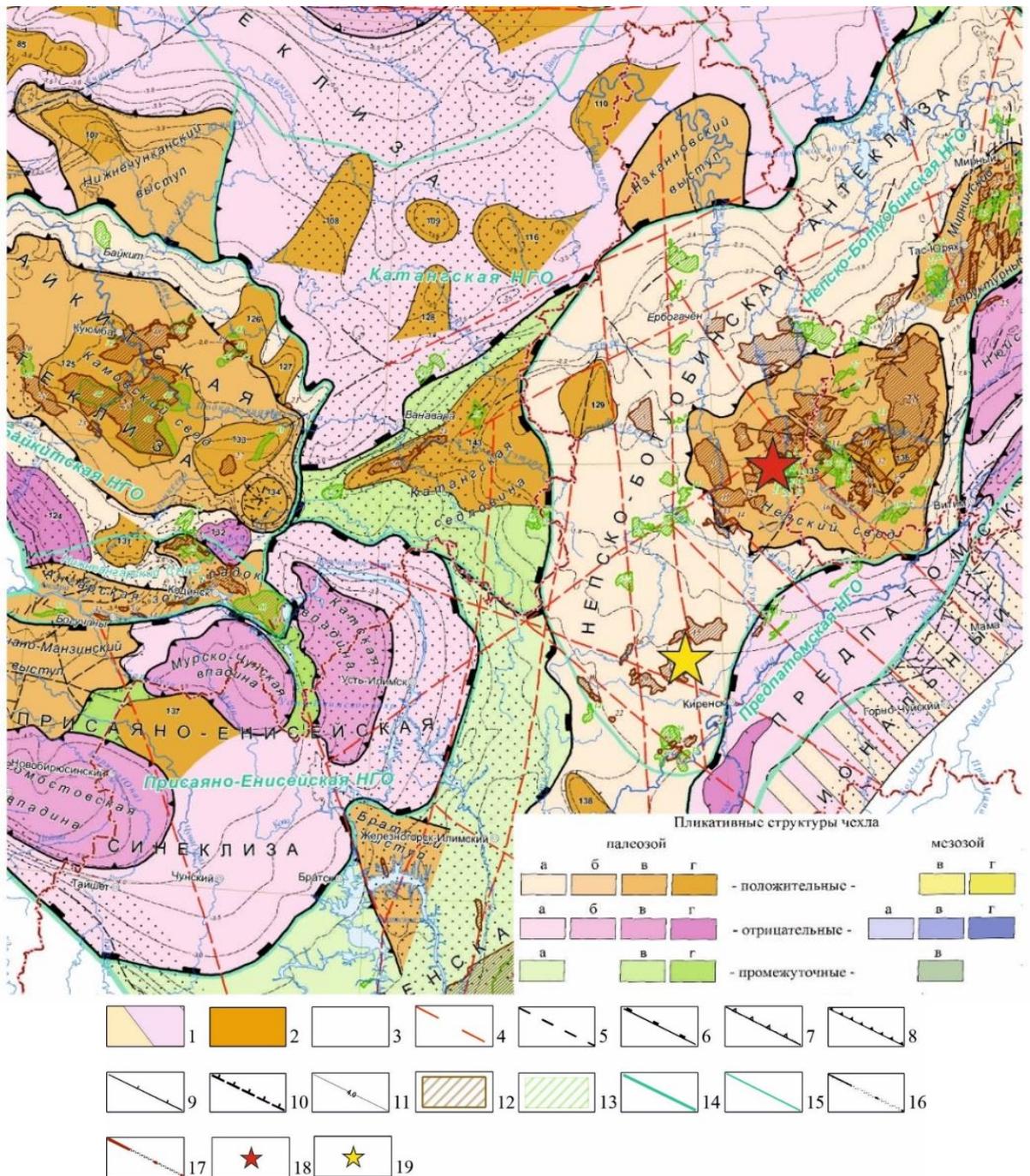


Рис. 3.2 – Схематическая карта основных тектонических структур юга Сибирской платформы (по В.С. Старосельцеву, 2018):

- 1 – зона складчато-надвиговых дислокаций; 2 – выходы кристаллического фундамента; 3 – зоны интенсивного рифейского прогибания; 4 – региональные глубинные разломы; 5 – разрывы, установленные геологической съемкой, сейсморазведкой и подтвержденные бурением; 6–10 – контуры: 6 – надпорядковых структур, 7 – суперпорядковых структур, 8 – структур первого порядка, 9 – структур второго порядка, 10 – предполагаемые выделения; 11 – стратоизогибсы венда – кембрия; 12 – месторождения углеводородов; 13 – подготовленные месторождения; 14, 15 – нефтегеологическое районирование; 16, 17 – государственные границы и субъектов РФ; 18 – местоположение первого участка исследований; 19 – местоположение второго участка исследований

Первый участок располагается в пределах Непского свода, представляющего собой крупнейший структурный элемент Непско-Ботуобинской антеклизы, и является надпорядковой структурой Сибирской платформы, которая расположена на юго-востоке Непско-Ботуобинской антеклизы и имеет размеры  $850 \times 350$  км, амплитуду порядка 1000 м и площадь около 235 тыс. км<sup>2</sup>. В направлении от погруженных зон краевых частей Непско-Ботуобинской антеклизы в центральной части Непского свода происходит значительное сокращение толщины осадочного чехла за счет постепенного выклинивания базальных пачек, а также сокращения мощностей остальных свит. Изложенные материалы свидетельствуют о древнем заложении Непского свода [Семинский, 2003]. Толщина подсолевых отложений закономерно уменьшается в северном, северо-восточном направлениях (вверх по восстанию моноклиналичного склона Непского свода) от 384–390 до 424–436 м.

В тектоническом отношении второй рассматриваемый участок расположен в южной части Непско-Ботуобинской антеклизы (см. Рис. 3.2) [Конторович и др., 1975, Конторович, 2008]. Подсолевой (нижний) структурный комплекс включает отложения от кровли осинского горизонта усольской свиты до поверхности кристаллического фундамента. Строение подсолевых отложений наиболее изучено глубоким бурением в пределах южного – юго-восточного склонов Непско-Ботуобинской антеклизы. Этот район антеклизы характеризуется пологим подъемом поверхности фундамента и подсолевых отложений кембрия в северном – северо-восточном направлении. Воздымание подсолевых отложений происходит сравнительно равномерно за исключением участков локальных структурных осложнений. В среднем по южному склону Непско-Ботуобинской антеклизы градиент падения пород составляет по поверхности фундамента 3.5 м на 1 км, а по кровле мотской свиты около 3 м на 1 км.

### **3.2. Оценка качества инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований на примере геологического разреза Непского свода (участок 1)**

В данном параграфе на примере площадных съемок ЗСБ 3D показан результат применения пространственного накопления в процессе инверсии, а также представлены примеры оценки ошибки определения УЭС и оценки качества инверсии. На основе предложенных оценок проводился выбор итоговой модели месторождения и был выполнен прогноз насыщения горизонтов-коллекторов.

#### **3.2.1. Объект исследований и физико-геологическая модель**

В платформенном чехле рассматриваемой территории по структурно-тектоническим и литологическим признакам выделяется три комплекса: подсолевой (рифей-венд-нижнекембрийский), соленосный (нижнекембрийский) и надсолевой комплекс, представленный отложениями ниже-средне-верхнекембрийского, ордовикского, юрского

возраста [Анциферов, 1981]. Толщина осадочного чехла на территории исследования варьирует от 1667 до 1816 м (Рис. 3.3).

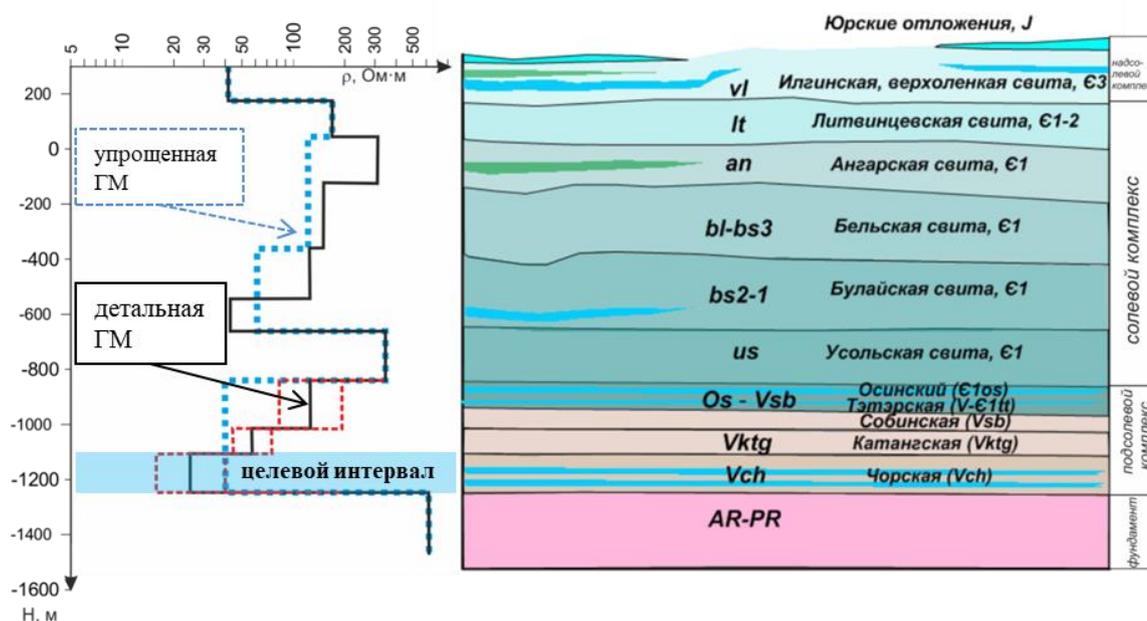


Рис. 3.3 – Типичная геоэлектрическая модель осадочного чехла Непского свода

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 (верхоленьская, илгинская свиты), а также отложения ордовика, перми, карбона, триаса, юры и четвертичные. Мощность отложений составляет 0–500 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, удельное сопротивление изменяется в пределах от 45 до 500 Ом·м. По данным ЗСБ комплекс разделяется на 4–6 геоэлектрических горизонта.

Отложения подсолевого комплекса стратиграфически соотносятся с карбонатными, сульфатно-карбонатными и терригенными отложениями венд-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. При переходе к детальным моделям сред по данным ГИС и ЗСБ подсолевой комплекс дифференцируется на 2–3 геоэлектрических горизонта с различным УЭС.

Породы кристаллического фундамента являются основным опорным горизонтом, который обладает высоким удельным сопротивлением, как правило, превышающим 1000 Ом·м.

Таким образом, разрез осадочного чехла сложен породами, различающимися по продольному сопротивлению, что является благоприятным фактором для изучения методом ЗСБ.

### 3.2.2. Методика работ зондирования становлением поля в ближней зоне

Работы выполнялись с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM [Шарлов и др., 2010] по регулярной плотной сети шестиразносными установками. Источником нестационарного поля была генераторная петля размером 600×600 м, в которую подавался ток до 250 А, приемные пели размером 18×18 м располагались на удалении 140, 500, 900 м от центра источника (Рис. 3.4).

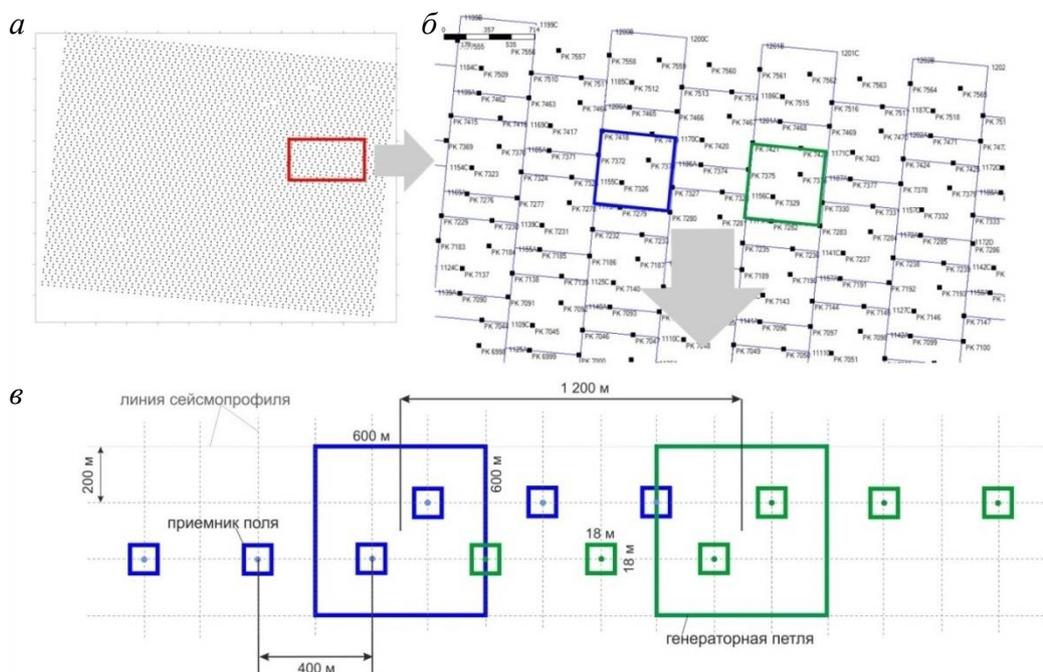


Рис. 3.4 – Схема установок зондирования становлением поля в ближней зоне:  
 а – схема точек зондирования становлением поля в ближней зоне на участке;  
 б – фрагмент сети источников и приемников электромагнитного поля;  
 в – схема двух установок зондирования становлением поля в ближней зоне

Выбор параметров установки обусловлен, с одной стороны, необходимой глубиной исследований – 2–3 км, с другой – существующей 3D-сетью сейсмопрофилей 200×200 м, относительно которой размещались источник и приемники поля. При площадных наблюдениях изучаемый контур заполняется наблюдениями по равномерной сети.

### 3.2.3. Оценка ошибки определения удельного электрического сопротивления

В рамках интерпретационного процесса, выполненного по плотной сети наблюдений, проведена апробация предложенной методики оценки погрешности УЭС слоя. Для

оценок выбран участок, на котором зарегистрированы кривые ЗСБ, осложненные влиянием ВПИ и геоэлектрических неоднородностей, для которого проводится оценка погрешности определения геоэлектрических параметров для каждой наблюдаемой точки зондирования (Рис. 3.5).

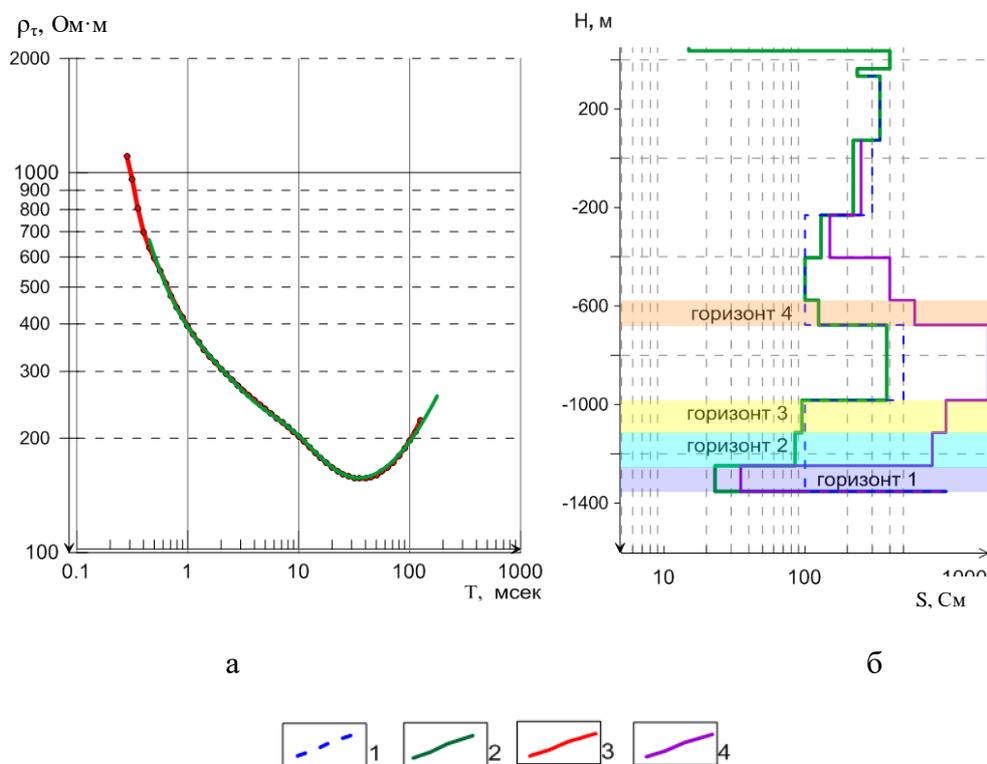


Рис. 3.5 – Геоэлектрическая модель в районе эталонной скважины:

- а – трансформанта кажущегося сопротивления  $\rho(\tau)$ ; б – геоэлектрическая модель  
 1 – стартовая модель инверсии; 2 – теоретическая кривая  $\rho(\tau)$  и геоэлектрическая модель по данным зондирования становлением поля в ближней зоне; 3 – практическая кривая;  
 4 – осредненная геоэлектрическая модель по данным бокового каротажа:

Примечание: горизонт 1 – катангская, чорская свиты и КВ, V- $\epsilon_1$ ; 2 – собинская, тэтэрская свиты,  $\epsilon_1$ ; 3 – осинский и усть-кутский горизонты,  $\epsilon_1$ ; 4 – нижнебельская подсвита,  $\epsilon_1$ .

В результате инверсии на основе эталонной модели восстановлена выборка из 100 моделей. Построены диаграммы распределения УЭС в точке ЗСБ (Рис. 3.6) и точечные диаграммы связи ошибки  $\Delta\rho$  и коэффициента вариации  $V$  (Рис. 3.7), на которых отмечается присутствие линейных зависимостей для выборок четырех исследуемых горизонтов. Коэффициент корреляции  $r$  для целевого горизонта 1 составил 0.88. Уравнение, рассчитанное при построении зависимостей, применялось для перехода от полученного при инверсии показателя вариации  $V$ , %, к ошибке определения сопротивления горизонта 1  $\Delta\rho$ , %.

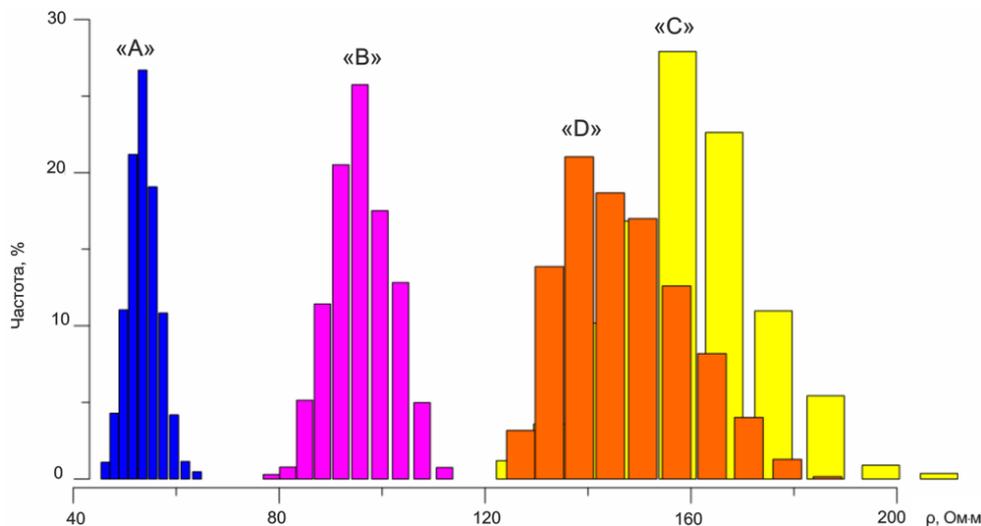


Рис. 3.6 – Результативные выборки удельного электрического сопротивления для одной модели:

А – катангская, чорская свиты и КВ, V–Є1; В – собинская, тэтэрская свиты, Є1; С – осинский и усть-кутский горизонты, Є1; D – нижнебельская подсвита, Є1.

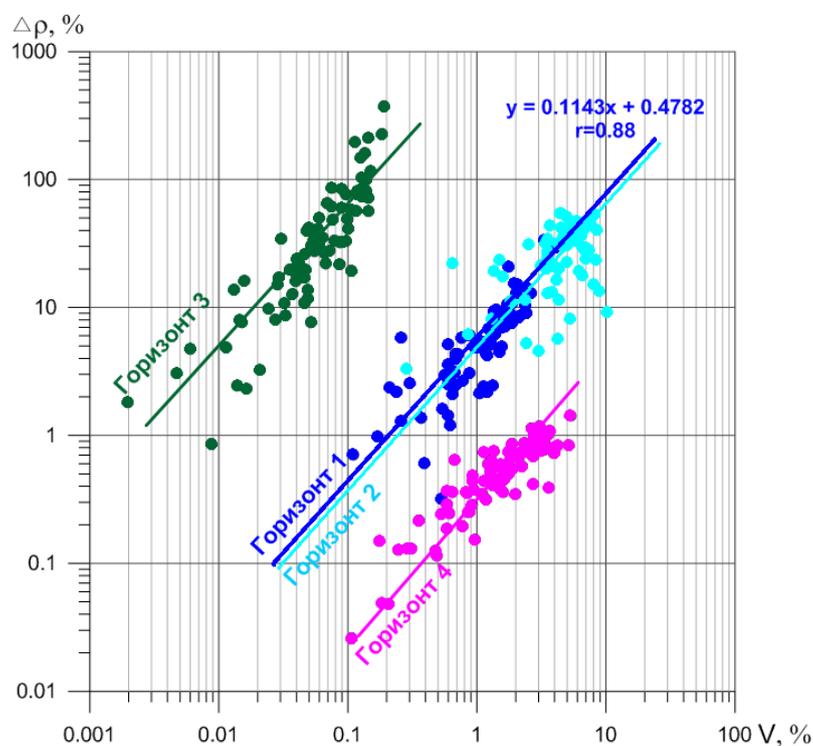


Рис. 3.7 – Результативные выборки отношения рассчитанного значения ошибки удельного электрического сопротивления и коэффициента вариации:

Горизонт 1 – катангская, чорская свиты и КВ, V–Є1; 2 – собинская, тэтэрская свиты, Є1; 3 – осинский и усть-кутский горизонты, Є1; 4 – нижнебельская подсвита, Є1.

Последовательность проведения инверсии кривых на основе эталонной модели соответствует применяемой на модельных данных от генерализованной модели (см. гл. 2 § 2.4.2). Полученное уравнение аппроксимации позволяет перейти от показателя вариации  $V, \%$ , к ошибке определения УЭС горизонта 1  $\Delta\rho, \%$ , (Рис. 3.8в,г).

Автором приведены карты распределения продольного сопротивления отложений подсолевой части разреза (Рис. 3.8а) и ошибки восстановления его сопротивления (Рис. 3.8б). При анализе результативных карт выделено несколько зон, наиболее сильно под-

верженных влиянию эквивалентности [Мурзина и др., 2018] при определении геоэлектрических параметров целевого интервала.

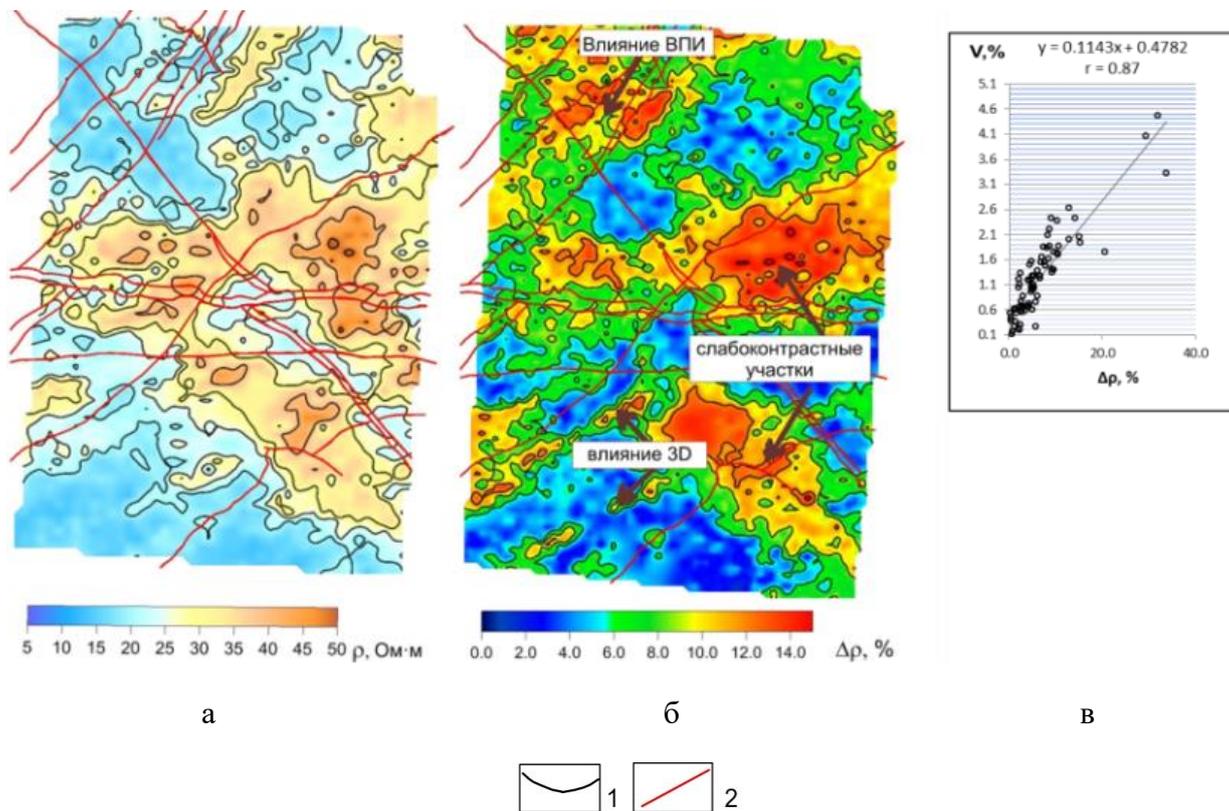


Рис. 3.8 – Результат решения обратной задачи в интервале нижнемотской подсвиты: а – карта продольного сопротивления; б – карта ошибки определения продольного сопротивления; в – уравнение регрессии и диаграмма связи коэффициента вариации и ошибки удельного электрического сопротивления:

1 – изолинии сопротивлений; 2 – линии разломов, определенные методом сейсморазведки общей глубинной точки

Зоны разрывных нарушений северо-западного и западного направлений в центральной части площади характеризуются высокими УЭС. Таким участкам соответствуют высокие значения показателя вариации, а на картах ошибок определения сопротивления – повышенные значения ошибок УЭС. Связано это с тем, что вихревые токи не застревают в высокоомной среде и чувствительности к высокоомным горизонтам нет.

В северо-западной части участка проявляются максимальные значения на картах ошибок определения сопротивления. Здесь интерпретация осложнена проявлением эквивалентности, связанной с частотно-зависимой дисперсией электрического сопротивления [Каменецкий, Тимофеев, 1984; Каменецкий, 1997; Каменецкий и др. 2014; Антонов, Шейн, 2008; Антонов и др., 2011, 2013; Компаниец и др., 2013, 2019 Компаниец, 2020]. Две аномалии показателя вариации в юго-западной части участка, расположенные параллельно разломам северо-восточного простирания, связаны с присутствием влияния геоэлектрических неоднородностей на кривые (Рис. 3.8б).

Таким образом, использование коэффициента вариации в качестве меры погрешности позволяет оценить надежность решения обратной задачи в зависимости от геоэлектрических условий, отражая чувствительность метода ЗСБ к определению геоэлектрических параметров и степень эквивалентности исследуемого горизонта.

При пересчете через уравнение регрессии коэффициента вариации и ошибки УЭС выделяется несколько участков, сильно подверженных различного рода влияниям, при определении геоэлектрических параметров целевого интервала:

- области с высоким УЭС;
- влияние частотной дисперсии удельного сопротивления;
- влияние геоэлектрических неоднородностей (вдоль разломных зон);
- зоны высоких значений невязки (более 5 %).

#### **3.2.4. Выбор итогового результата при помощи системы оценки качества инверсии EMI<sub>n</sub>Q**

Несомненно, оценка невязок несет в себе описание точности результата интерпретации данных ЗСБ, иными словами, отражает процент приближения итоговой модели к реальной модели изучаемой среды. В силу того, что невязка зависит от качества полевого материала, отражая влияние систематических или случайных погрешностей [Гусейнов, 2015], данная оценка не всегда объективно позволяет судить о результате решения обратной задачи. В качестве примера автоматической инверсии приведен результат выполненного по высокоплотной сети наблюдений объекта. Всего в оценке участвовало более 5000 кривых зондирований.

Для апробации методики оценки качества за основу взято два независимых результата интерпретации кривых ЗСБ (Рис. 3.9а,б). Первая карта УЭС является результатом поточечной инверсии (см. Рис. 3.9а), вторая – инверсии с применением пространственного накопления (см. Рис. 3.9б). Карты УЭС, полученные в результате решения обратной задачи, в первом случае (Рис. 3.9а) не соответствуют приемлемому качеству инверсии в силу присутствия единичных локальных «выбросов». Во втором случае карты более выдержанны, прослеживается устойчивая зональность по площади.

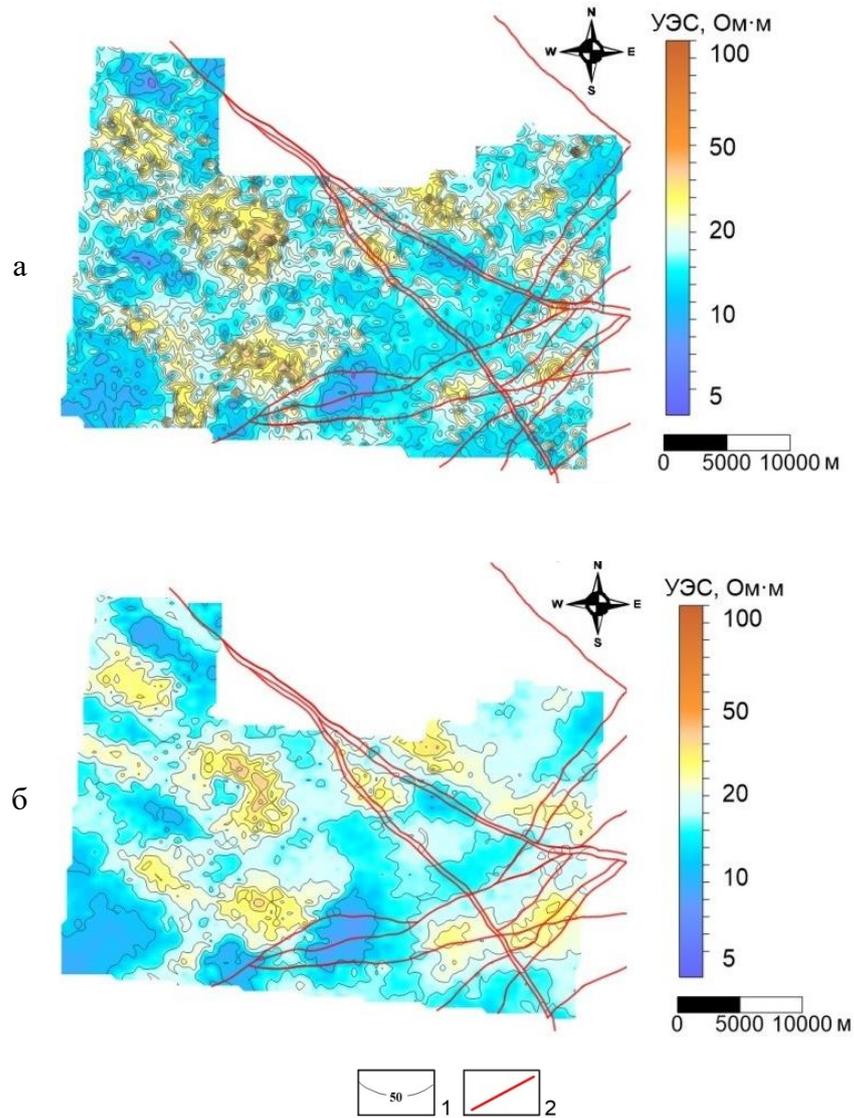


Рис. 3.9 – Карты продольного сопротивления нижнемотской подсветы:  
 а – применение стандартной методики; б – применение методики  
 пространственного фильтра при инверсии  
 1 – изолинии удельного электрического сопротивления; 2 – разломы по данным  
 площадной сейсморазведки метод общей глубинной точки

Невязки в результате решения обратной задачи и в первом, и во втором случае почти идентичны (Рис. 3.10).

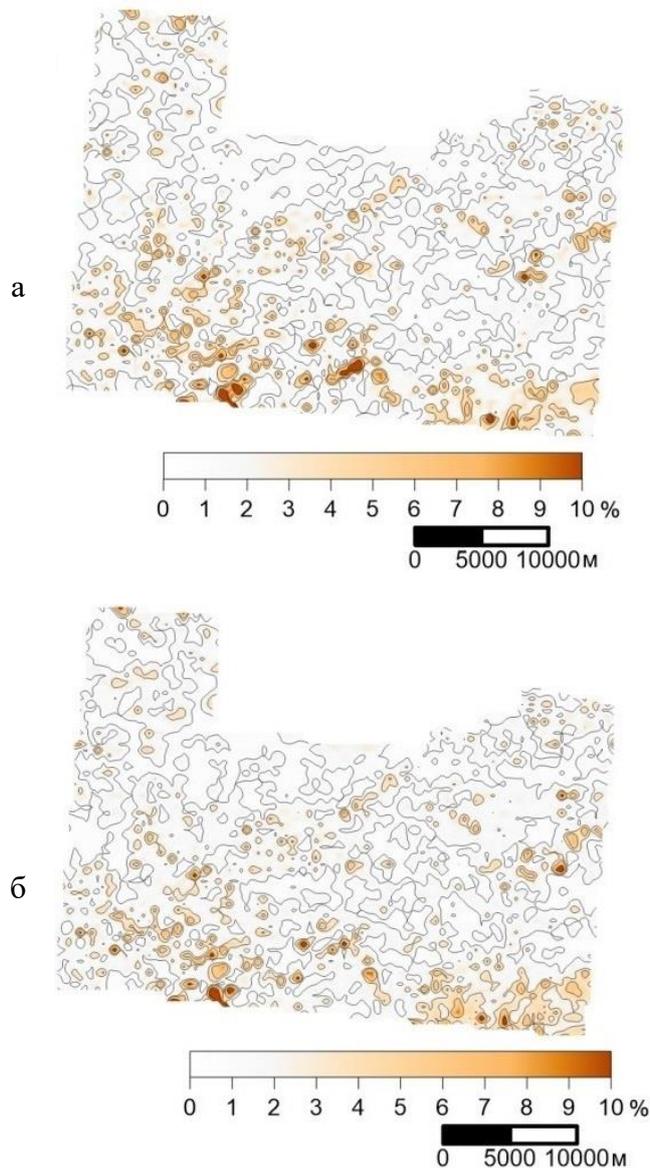


Рис. 3.10 – Карты невязки:

а – применение стандартной методики; б – применение методики пространственного фильтра при инверсии

Для оценки качества использовались невязка и латеральная выдержанность, граничные уровни для которых были показаны ранее на Рис. 3.11. Результативные оценки представлены на рис. 3.12 (Таблица 3.1)

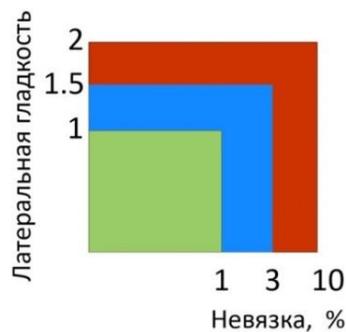


Рис. 3.11 – Диаграмма граничных уровней оценок результата инверсии

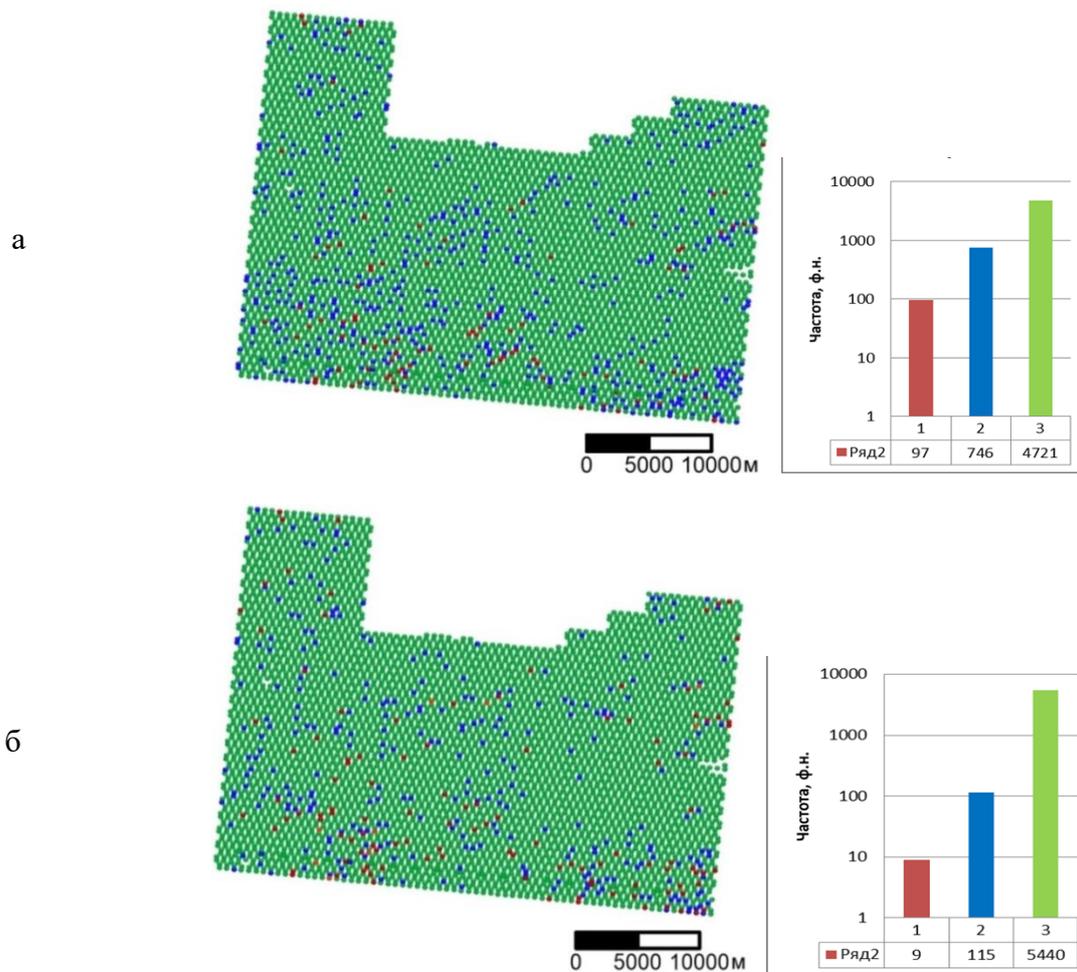


Рис. 3.12 – Карты качества критерия  $InQ$  и гистограмма:  
 а – результат поточечной инверсии; б – результат применения  
 методики пространственного фильтра при инверсии

Таблица 3.1

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

*Невязка.* 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 1 % относятся к хорошему качеству. Согласно инструкции по электроразведке, расхождения между наблюдаемыми сигналами ЗСБ при проведении контрольных наблюдений не должны превышать 5 %. Минимальное расхождение между теоретической и практической кривой, равное 5 %, при оценке результата служит границей отбраковки некондиционного материала.

*Латеральная выдержанность  $L$ .* В качестве оценок отклонения применяется средневзвешенное 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 выдержанным по латерали (Рис. 3.12б). Большая часть точек отнесена к хорошему качеству инверсии. Среднее значение показателя  $InQ$  выше во втором случае (0.98), нежели в первом (0.96) (Таблица 3.1). Таким образом, путем выбора наилучших невязок и оптимальной выдержанности параметра УЭС в слоях второй вариант инверсии определен как наиболее оптимальный.

### **3.2.5. Пример комплексной оценки качества инверсии и качества полевого материала данных площадного зондирования становлением поля в ближней зоне**

*Комплексная оценка относительной погрешности  $\delta$  и латеральной гладкости  $L$  и параметра  $Ks$  ( $Df$ ).* Оценка относительной погрешности  $\delta$  и степени расхождения кривых в установке  $Ks$  позволяет выделить из большого объема данных кривые с высокими значениями невязки, осложненные эффектами отклонения среды от одномерной модели (Рис. 3.13, А, Б). В связи с этим достоверность задания параметров поляризации при инверсии кривых является важным этапом, влияющим на корректность определения сопротивлений. В случае, когда оценки  $Ks$  завышены и  $L$  не соответствует приемлемому качеству, то вероятно, необходимо прибегнуть к другим алгоритмам решения обратной задачи ЗСБ (3D инверсии) (Рис. 3.13, А, Б).

Присутствие различного рода влияния на кривые ЗСБ, в том числе эффекта ВПИ на кривых ЗСБ, обычно искажает значения сопротивлений. Поэтому при оценке латеральной гладкости  $L$  совместно с критерием  $Ks$  или  $Df$  возможно выявить правильность учета ВПИ или магнитной вязкости. В случае, когда оценки  $Ks$  завышены и  $L$  не соответствует приемлемому качеству, то вероятно, необходимо уточнить результат интерпретации и сделать дополнительную итерацию инверсии.

*Комплексная оценка латеральной выдержанности  $L$  и суммарной погрешности измерения кривой  $Et$ .* Оценка латеральной выдержанности и погрешности измерения кривой ЗСБ позволяет определить точки ЗСБ, на которых «выбросы» в результате инверсии связаны со случайной погрешностью измерений.

*Оценка качества инверсии  $InQ$  и качества полевого материала  $QC$ .* При оценке всех критериев качества, существует возможность сделать вывод об объективности и надежности полученного результата инверсии и выявить причину осложнения процесса инверсии. В данном случае (Рис. 3.13а,б), когда оценки  $QC$  и  $InQ$  ниже 0.8, необходимо прибегнуть к алгоритмам 3D-инверсии данных ЗСБ.

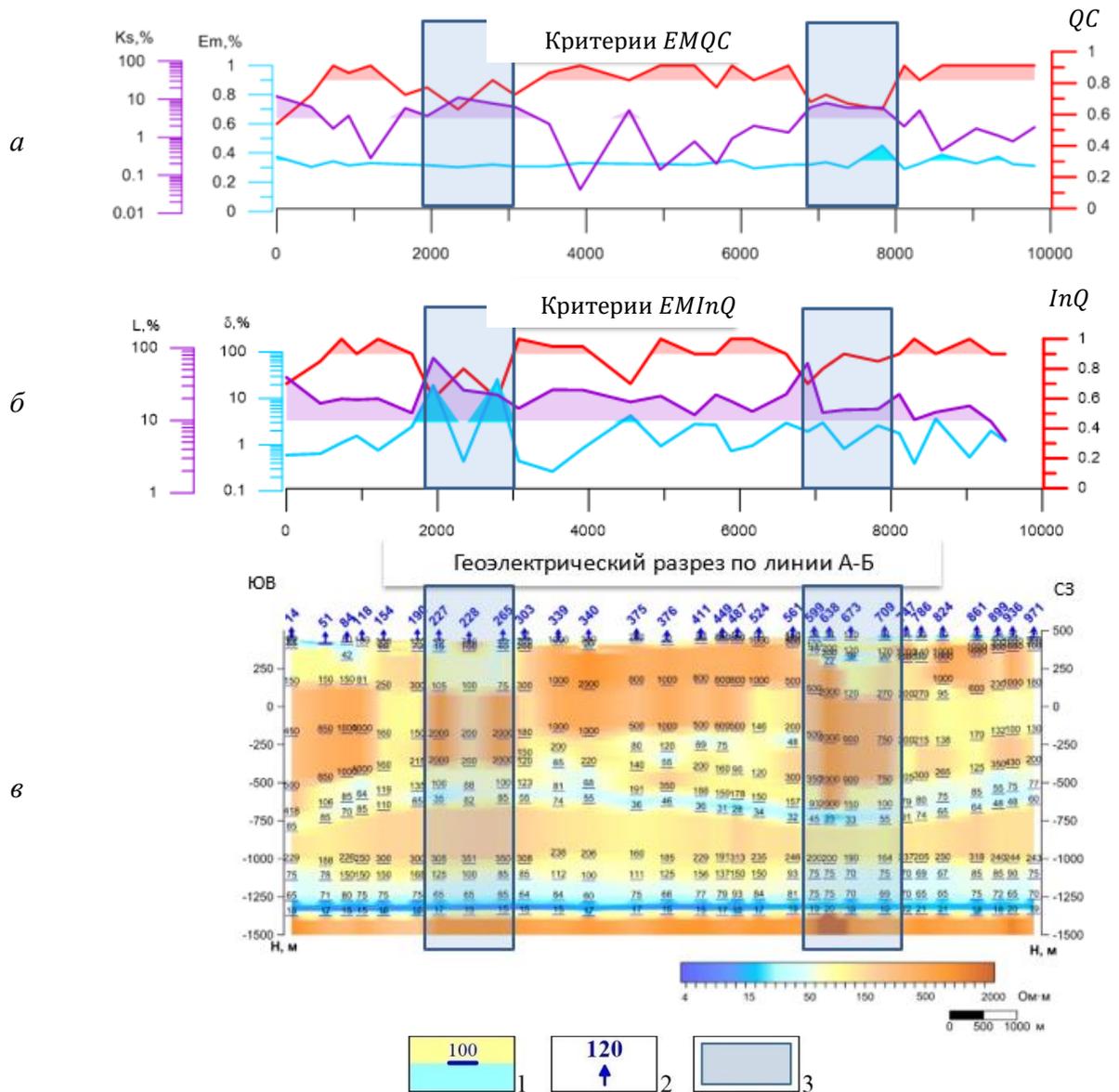


Рис. 3.13 – Графики критериев качества полевого материала системы EMQC [Гусейнов, 2012] (а), качества инверсии EMInQ (б) и геоэлектрический разрез (в), полученный в результате инверсии  
1 – геоэлектрические границы по данным ЗСБ; 2 – пункты наблюдений ЗСБ; геоэлектрические неоднородности

### 3.2.6. 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 данные ЗСБ за период работ 2012–2015 гг.

В целом распределение геоэлектрических характеристик подсолевого комплекса является однородным и лишь в отдельных зонах оно осложнено влиянием тектонических и литологических факторов. Нижний подгоризонт, являющийся целевым объектом исследований, объединяет преобразенский пласт, терригенные породы чорской свиты и кору выветривания. УЭС пород по данным ЗСБ изменяется от 15 до 50 Ом·м. Распределения

УЭС до 18 Ом·м отнесены преимущественно к водному насыщению. УЭС от 18 до 28 Ом·м отнесены к насыщению преимущественно нефть-газ, и выше 28 Ом·м – не коллектор.

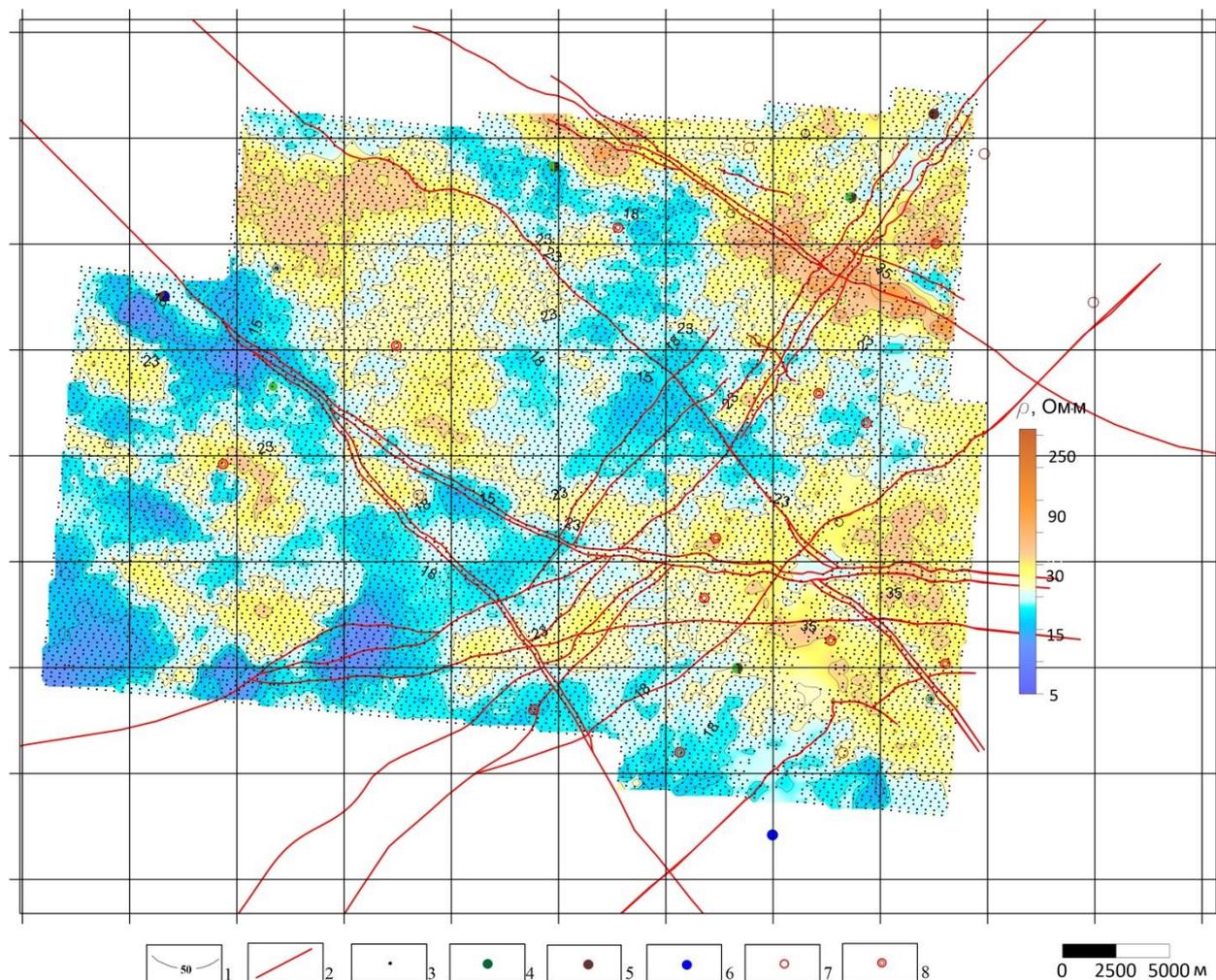


Рис. 3.14 – Карта удельного электрического сопротивления терригенных отложений по результатам интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне:

1 – изолинии сопротивления по данным зондирования становлением поля в ближней зоне, Ом·м.;  
 2 – разломы по МОГТ 3D; 3 – точки ЗСБ; 4–7 – скважины глубокого бурения прогнозные и пробуренные с указанием насыщения: 4 – газ; 5 – нефть; 6 – вода; 7 – сухо; 8 – проектные скважины.

По итоговым картам УЭС терригенных отложений давался прогноз на заложение скважин. Для представленной выборки коэффициент Стьюдента составляет 1.3, что говорит о доверительной вероятности 0.8. Таким образом, достоверность прогноза по данным ЗСБ составила в среднем 80 % (табл. 3.2).

Оценка достоверности прогноза по данным зондирования становлением поля в ближней зоне

Номер	Прогноз по зондированию становлением поля в ближней зоне	Факт по притоку	Период прогноза	Достоверность прогноза
1	Коллектор	Б12_QГ – 8 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QГ – 1.2 м <sup>3</sup> /сут.	Во время бурения	–
2	Коллектор	Б12_ QН – 1.3 м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QГ – 2.2 м <sup>3</sup> /сут.	После бурения	–
3	Коллектор	Б12_ QГ – 28. тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В10_ QГ – 3.2 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QВ – 6.5 м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	100 %
4	Коллектор углеводородов	В13_ QН – 25.9 м <sup>3</sup> /сут.; QГ – 2.6 тыс. м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	80 %
5	Коллектор углеводородов	Б12_ QГ – 5.5 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В10_ QГ – 3.4 тыс. м <sup>3</sup> /сут.	После бурения	–
6	Коллектор углеводородов	Б12_ QГ – 21. тыс. м <sup>3</sup> /сут.; Б13_ QГ – 13.6 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QН – 5.2 м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	100 %
7	Коллектор углеводородов	В13_ QГ – 36.3 м <sup>3</sup> /сут.	После бурения	–
9	Коллектор углеводородов + вода	Б12_ QН – 2.2 м <sup>3</sup> /сут.; В10-13_ QГ – 53 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; QВ – 33.9 м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	100 %
10	«Сухая» / низкодебитная	В10_ QН – 0.27 м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QВ – 3.2 м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	90 %
11	«Сухая» / низкодебитная	Б12_ QН – 2.4 м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QВ – 12.1 м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	90 %
12	«Сухая» / низкодебитная	Нет притоков	Во время бурения	–
13	«Сухая» / низкодебитная	Б12_ QГ – 6.98 тыс. м <sup>3</sup> /сут.; В13_ QГ – 18.3 тыс. м <sup>3</sup> /сут.	До бурения	10 %
14	Низкоемкостный коллектор	Засоленный коллектор	До бурения	100 %
Средняя оценка достоверности прогноза				80 %

### **3.3. Оценка качества инверсии данных площадных зондирований, полученных на юге Непско-Ботубинской антеклизы (участок 2)**

В данном параграфе на примере площадных съемок ЗСБ 3D показан результат применения подхода пространственного накопления в процессе инверсии, пример оценки качества инверсии. На основе предложенных оценок проводилось построение итоговой модели месторождения.

Район участка исследований входит в состав Приленской плоской возвышенности, которая является частью обширного Среднесибирского плоскогорья, представляющего собой слабо всхолмленную равнину, образованную широкими плоскими водоразделами, глубокого расчлененными современной гидросетью. Основная часть участка расположена на водоразделе между верховьями рек Нижней Тунгуски и Непы.

#### **3.3.1. Физико-геологическая модель месторождения и объект исследований**

Обобщенная геоэлектрическая модель изучаемого участка 3D электромагнитных исследований (Рис. 3.15) составлена на основе данных о стратиграфии района и результатах бурения глубокой скважины [Полетаева, Турицын, 1988]. По данным ГИС выделяются четыре геоэлектрических комплекса: три – в осадочном чехле и четвертый – фундамент.

Первый геоэлектрический комплекс представлен породами кристаллического фундамента. Он является основным опорным горизонтом, который обладает высоким УЭС порядка 1000 Ом·м.

Второй геоэлектрический комплекс соответствует отложениям подсолевого комплекса (мотская свита и нижняя часть усольской свиты – осинский горизонт), сложенного карбонатными и терригенными породами венд-нижнего кембрия. Комплекс характеризуется пониженными значениями УЭС за счет проводящих терригенных отложений венда и карбонатно-глинистых отложений нижнего кембрия. Мощность комплекса – 310–350 м. Данный комплекс включает в себя следующие горизонты-коллекторы: ярактинский, преображенский, усть-кутский, осинский.

Основные перспективы нефтегазоносности вблизи исследуемого участка связаны с базальными терригенными отложениями нижнемотской подсвиты так называемой ярактинской пачкой, которая залегает непосредственно на породах кристаллического фундамента и осинском горизонте.

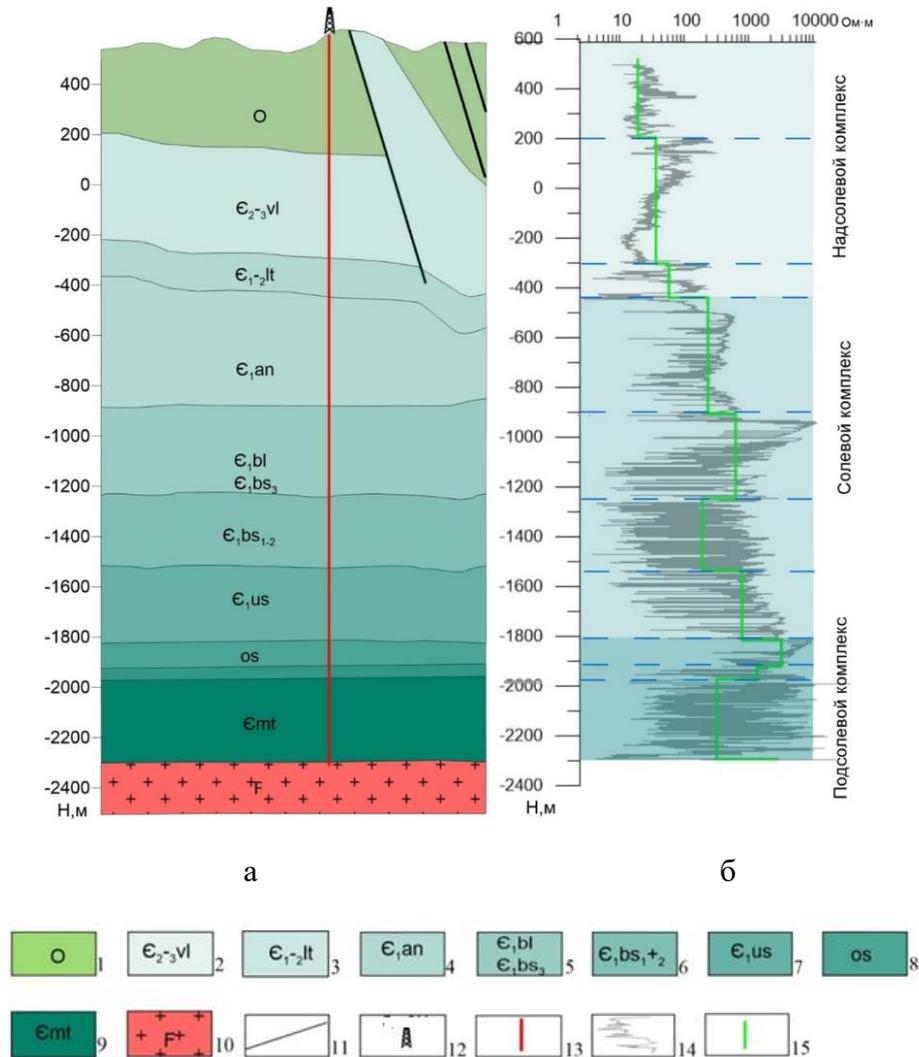


Рис. 3.15 – Обобщенная геолого-геоэлектрическая модель разреза осадочного чехла на участке 3D электромагнитного мониторинга:  
 а – сводный геологический разрез осадочного чехла;  
 б – геоэлектрическая модель по данным бокового каротажа  
 1–9 – породы осадочного чехла: 1–отложения ордовика, 2–8 – породы кембрия (2 – верхоленская свита, 3 – литвинцевская свита, 4 – ангарская свита, 5 – булайско-бельская свита, 6 – бельская свита, 7 – усольская свита, 8 – осинский горизонт и средне-верхняя части мотской свиты); 9 – мотская свита; 10 – породы фундамента; 11 – тектонические нарушения по данным геологической карты масштаба 1:200000; 12 – скважины; 13 – ствол скважины; 14 – диаграмма бокового каротажа; 15 – усредненная модель

Осинский горизонт, являющийся объектом исследований, залегает в нижней части усольской свиты, сложен известковистыми доломитами, известняками. Мощность горизонта составляет 62–75 м. В пределах исследуемой площади из интервала осинского горизонта были получены притоки нефти, а также приток смеси нефти, газа и фильтрата бурового раствора.

Ярактинская пачка в вертикальном разрезе сложена в верхней части глинисто-алевролитовыми породами, ниже залегает ярактинский песчаный горизонт. Для пачки характерна фациальная изменчивость пород как по разрезу, так и по площади. Суммарные толщины песчаников изменяются в широких пределах. Песчаники имеют непостоянный вещественный и гранулометрический состав, что обуславливает невыдержанность коллек-

торских свойств. Песчаники ярактинской пачки серые, коричневато-серые, зеленовато- и темно-серые, реже светло-серые, разномерные от мелко до крупномерных, в меньшей мере алевроитистые и грубомерные до гравелитистых, от слабо до сильно глинистых, от плотных, крепких до слабо цементированных, массивные и тонкоплитчатые, участками слюдястые и пиритизированные, довольно часто с запахом бензина при ударе. Среди песчаников ярактинской пачки имеются разности с большей или меньшей степенью засоления. Алевролиты темно-серые, крепкие, массивные, прослоями обильно слюдястые. Аргиллиты зеленовато-голубовато-серые, тонкосреднеплитчатые, плотные, пиритизированные, участками алевроитистые и слабослюдястые, иногда с зеркалами скольжения.

Преображенский горизонт по данным бурения и ГИС повышенными коллекторскими свойствами не характеризуется. В связи с этим данный горизонт не опробовался.

Усть-кутский горизонт приурочен к верхней части верхнемотской подсвиты, сложен двумя пластами доломитов, разделенных пластом глинистых доломитов мощностью 8–10 м. Мощность горизонта составляет 63–65 м. Объект признан слабопроницаемым коллектором.

Третий комплекс (галогенно-карбонатный, соленосный) в целом характеризуется высокими УЭС. Солевой комплекс представлен галогенно-карбонатными породами среднего и нижнего кембрия. Он включает отложения ангарской, булайской, бельской и усольской свит. Суммарная мощность комплекса составляет 1000–1200 м, и характеризуется значениями УЭС 20–1000 Ом·м.

Появление среди отложений солевого комплекса пластов-коллекторов, насыщенных минерализованными растворами, способствует понижению продольного сопротивления соответствующих горизонтов.

Четвертый геоэлектрический комплекс включает в себя отложения надсолевой части осадочного чехла (литвинцевскую, верхоленскую и илгинскую свиты), а также отложения ордовика. Мощность отложений верхней части разреза составляет 600–700 м. Горизонт характеризуется различными значениями УЭС и может дифференцироваться на подгоризонты. Пониженные значения УЭС здесь связаны с присутствием глинистых отложений и влиянием водонасыщенных горизонтов-коллекторов.

В целом геоэлектрический разрез недр является благоприятным для прогноза коллекторских свойств и типа флюидонасыщения горизонтов-коллекторов подсолевого комплекса ввиду хорошей дифференциации осадочного чехла по УЭС горных пород, его небольшой мощности и невысокой суммарной проводимости.

### 3.3.2. Характеристика литологического строения осинского горизонта

Целевой интервал приурочен к карбонатным отложениям осинского горизонта усольской свиты томмотского яруса нижнего кембрия, Непской зоны Ангаро-Непского фациального района Непско-Ботубинской антеклизы юга Сибирской платформы [Мельников, 2018] (Рис. 3.16).

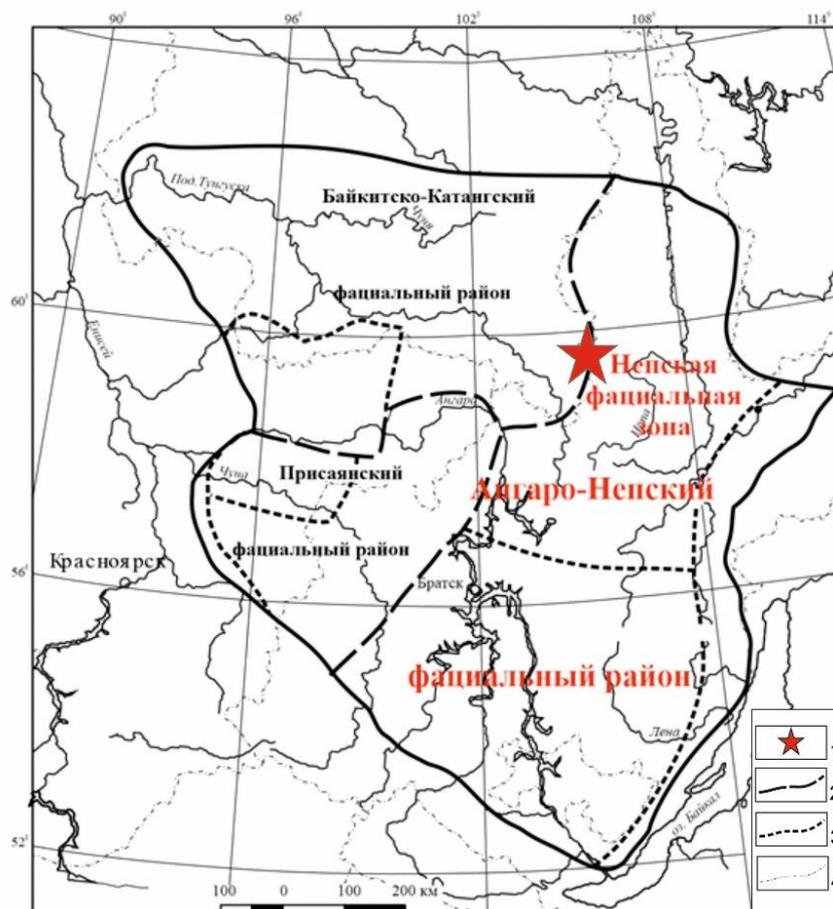


Рис. 3.16 – Фациальное районирование кембрийских отложений Турухано-Иркутско-Олекминского региона [Мельников, 2018]:

- 1 – объект исследований; 2 – границы фациальных районов;  
3 – границы фациальных зон; 4 – административные границы

Отложения осинского горизонта являются объектом нефтегазонакопления. В региональном плане изученная территория относится к Верхнетохомо-Катско-Пилюдинской зоне [Шемин, 2007] увеличенных толщин осинского горизонта, которая простирается в субширотном направлении от Верхоянотомской до Пилюдинской площади на расстояние около 900 км, включая южные участки Байкитской, Непско-Ботубинской антеклиз и Катангской седловины (рис. 3.19).

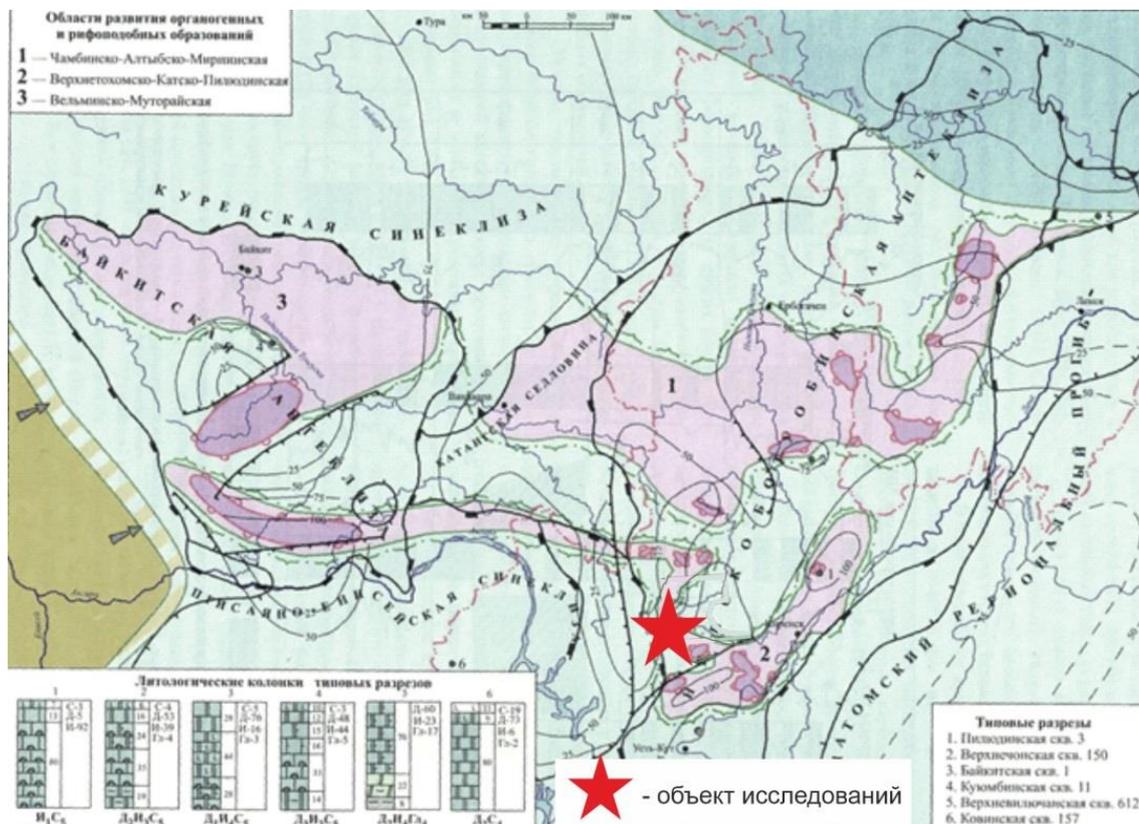


Рис. 3.17 – Литолого-палеогеографическая карта центральных районов Сибирской платформы (среднеусольское время) [Шемин, 2007]

В среднеусольское время осадконакопления (осинский горизонт) изучаемая территория относилась к обширной (протяженностью порядка 1000 км), но узкой (150 км) зоне, имеющей север-северо-восток-юг-юго-западное простирание. Обширная морская трансгрессия обусловила резкое понижение солености вод. В районе исследования в мелководных условиях шло формирование известняков [Бакина, и др., 2000]. В зонах увеличенных толщин сформировались известняки часто водорослевые, слагающие до 60–90 % разреза. Эти зоны представляли собой не что иное как рифоподобные и органогенные постройки, сформировавшиеся вблизи поверхности воды [Кузнецов, 2000а; Кузнецов и др., 2000б].

Согласно В.Г. Кузнецову, присутствие в разрезе пород разного состава и структурно-генетического типа образуют цикличность: нижний – с более глинистым основанием, средний – с фитогенными / водорослевыми известняками, верхний – отражает наибольшее развитие трансгрессии моря и представлен микрозернистыми доломитами в верхней регрессивной их части. При этом нижние и верхние части циклитов формировались в обстановке прибрежного мелководья, литорали и местами себхи, средние – в условиях мелкого моря.

Основные закономерности строения рифовых образований внутри Восточно-Сибирского бассейна схожи. Аналогом изучаемого объекта являются рифовые структуры, расположенные в пределах Верхнетитрисского и Большетитрисского лицензионных участков [Шемин, 2007].

На рисунке Рис. 3.18 приведена геоэлектрическая характеристика пород (КС). На разрезах скважин отражено, что в зонах сокращения общих толщин (20–40 м) осинский горизонт представлен карбонатно-глинистыми отложениями (доломитов, известковистых доломитов литорали и прилегающей мелководной сублиторали) и характеризуется пониженными сопротивлениями. В осевой части структура представлена преимущественно органическими известняками с повышенными значениями сопротивления.

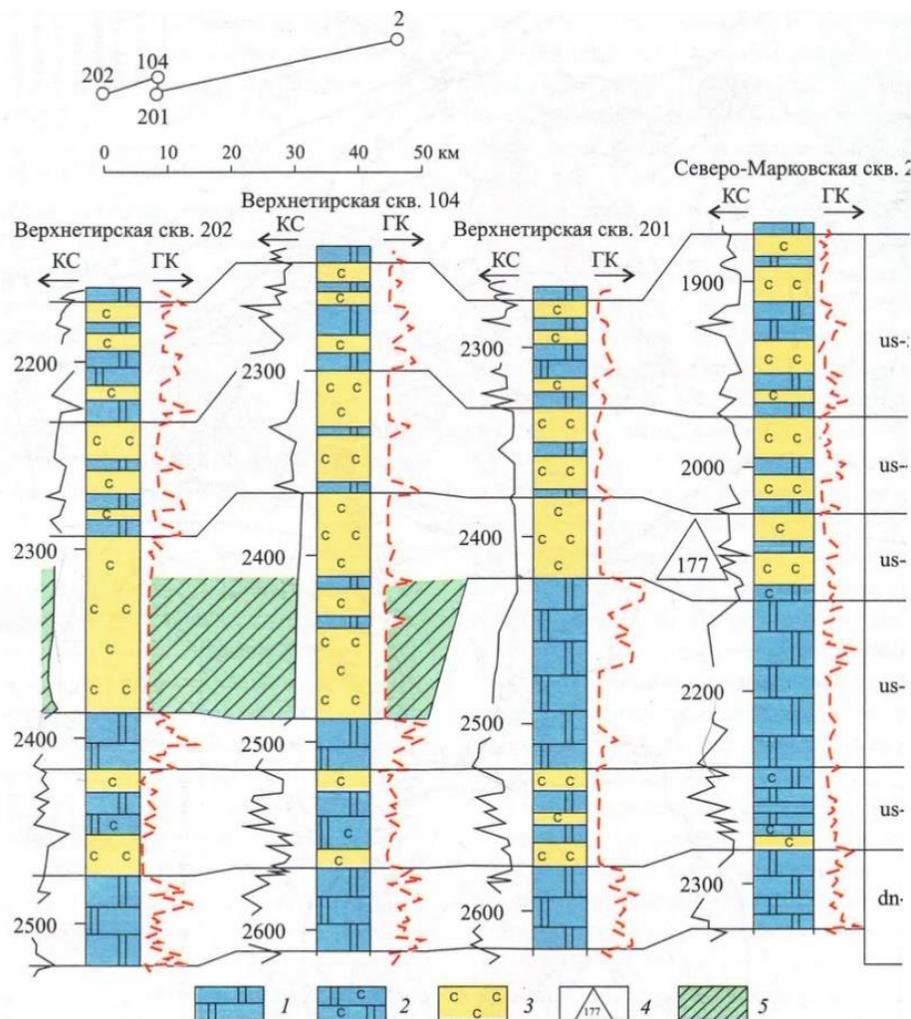


Рис. 3.18 – Некомпенсированное прогибание бассейна осадконакопления в осинское время на Верхнетирской площади [Шемин, 2007]:

- 1–3 породы: 1 – карбонатные, 2 – переслаивающиеся карбонатные и галогенные;  
3 – галогенные; 4 – местоположение пластовых интрузий и их толщина;  
5 – галогенные осадки, заполнившие некомпенсированные прогибы бассейна

Морфология органогенных сооружений, характеризуется двумя основными показателями: плановой конфигурацией и формой поперечного сечения распределения УЭС осинского горизонта по данным электроразведочных работ ЗСБ в пределах изучаемой территории и в контуре месторождения [Кузнецов и др., 2000б]

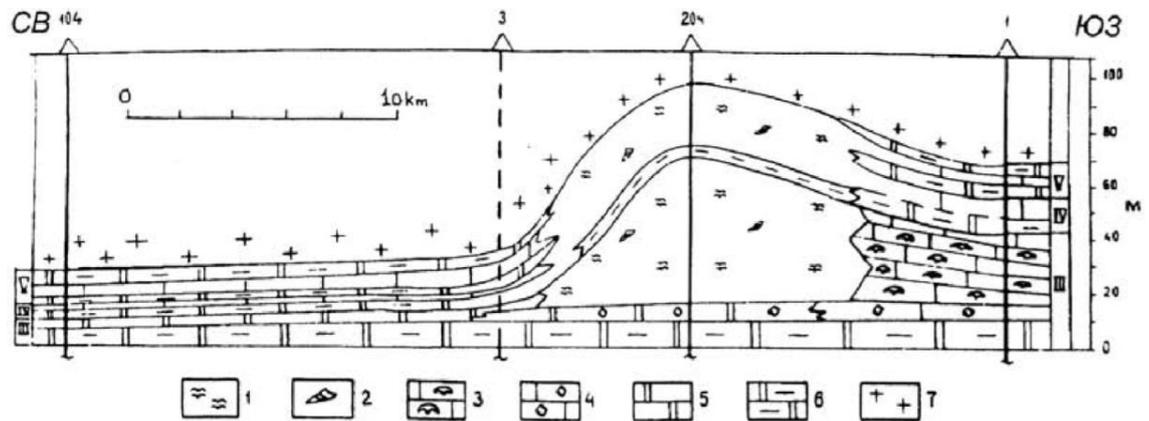


Рис. 3.19 – Строение осинского горизонта Верхнетирской и Большетирской площадей [Кузнецов и др., 2000б]:  
 1–4 известняки: 1 – биогермные, 2 – археациатовые, 3 – с органогенно-водорослевой структурой, 4 – средне мелко-кристаллические; 5–6 – доломиты: 5 – среднекристаллические, 6 – мелко-тонкокристаллические глинистые; 7 – каменная соль

Фациальные зоны у подножий отмелей, обрамляющих органогенные постройки, характеризуются малыми мощностями и глинисто-карбонатным составом. Повышенное содержание глинистого материала связано с его поступлением со склонов отмелей. Что касается малых мощностей, то их появление обусловлено сложным сочетанием скорости седиментации и тектонического прогибания.

Наличие низкоомных карбонатно-глинистых отложений в обрамлении рифа объясняет области пониженных значений сопротивления, которые прослеживаются на картах распределения УЭС осинского горизонта по данным электроразведочных работ ЗСБ в пределах изучаемой территории и в контуре месторождения [Бурдаков и др., 2020].

Необходимо отметить, что в геоэлектрической модели осинский горизонт ограничен структурными поверхностями по данным 3D-сейсморазведочных работ. Кровля горизонта соответствует ОГ А по данным МОГТ 3D. Указанная структурная поверхность проведена по кровле доломитов и при закреплении в геоэлектрической модели исключает из горизонта галогенные осадки, заполнившие некомпенсированные прогибы бассейна.

Рифовая структура характеризуется северо-западной ориентировкой и имеет ширину от 1.5 до 5 км, протяженность в рамках территории исследования составляет порядка 26 км.

Толщина отложений осинского горизонта изменяется от 50 до 110 м. Максимальные значения общих толщин (75–105 м) относятся к осевой части рифовой структуры.

Прогноз коллекторских свойств и характера насыщения осинского пласта формируется на основе карты продольного сопротивления геоэлектрического горизонта, приуроченного к стратиграфическому интервалу от кровли осинского горизонта до подошвы пласта Б<sub>1</sub>.

Большая часть территории электроразведочных работ ЗСБ относится к осевой части органогенной постройки (Рис. 3.20), которая сложена преимущественно биогермными и органогенно-водорослевыми доломитами и известняками [Жемчугова, 2014].

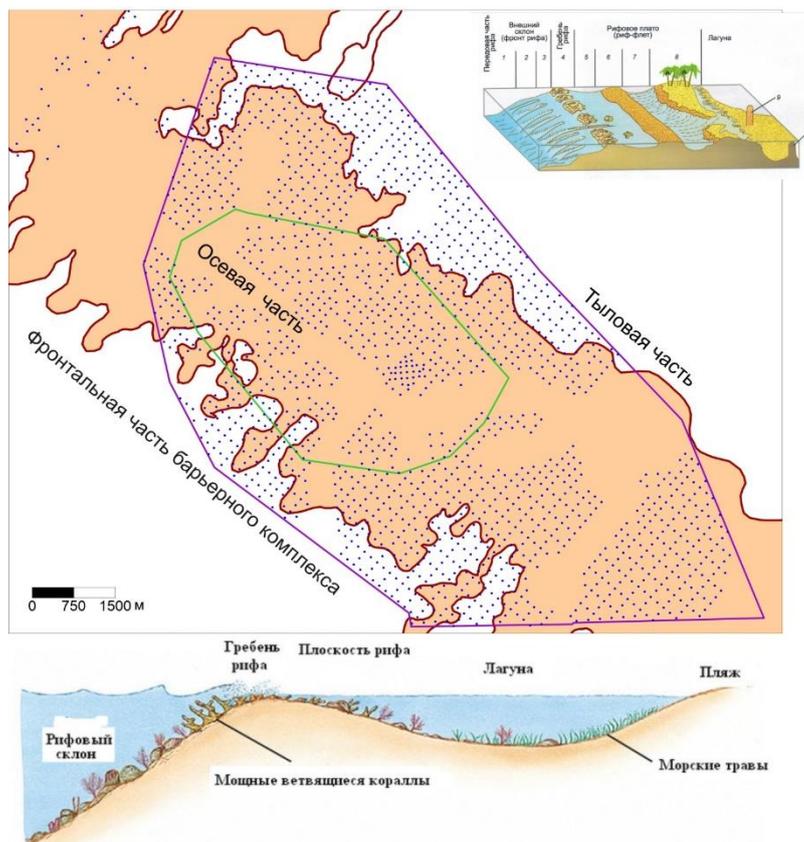


Рис. 3.20 – Схема расположения точек зондирования становлением поля в ближней зоне относительно рифовой структуры [Жемчугова, 2014]

На северо-востоке территория исследования включает в себя карбонатно-сульфатно-ангидритовые отложения тыловой отмели. На юго-западе частично изучена фронтальная предрифовая часть, представленная карбонатно-глинистыми отложениями передового склона и сублиторали.

Геоэлектрический горизонт, приуроченный к отложениям осинского горизонта, ограничен структурными поверхностями по данным 3D-сейсморазведочных работ: кровля соответствует границе отражающего горизонта А, подошва – нижней границе пласта Б<sub>1</sub> (Рис. 3.21).

Кровля осинского горизонта в пределах изучаемой территории изменяется от -1802 до -1911 м. Средние колебания кровли внутри рифовой структуры составляют порядка 40 м.

Юго-западная фронтальная граница рифа сопровождается резким изменением толщины в два раза от 60 до 30 м, в то время как северо-западная граница характеризуется пологим сокращением.

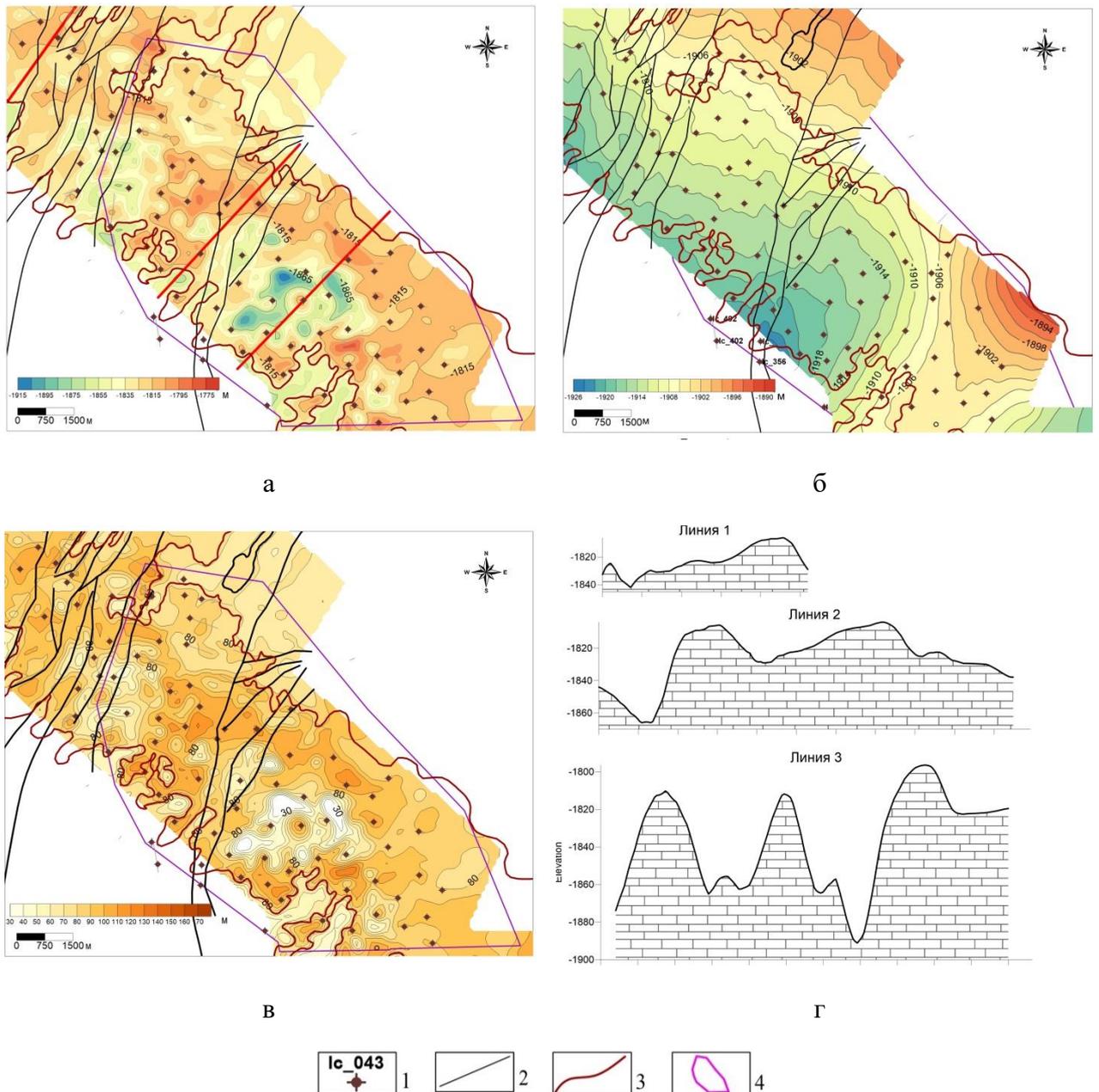


Рис. 3.21 – Структурные поверхности осинского горизонта:  
 а – ОГ А; б – подошва пласта Б1;  
 в – толщина А–Б1 (подошва); г – типовые профили  
 1 – пластопересечения; 2 – тектонические нарушения по данным МОГТ 3D;  
 3 – контур залежи (рифа); 5 – контур участка работ ЗСБ 4D 2019–2021 гг.

### 3.3.3. Методика работ зондирования становлением поля в ближней зоне

Работы выполнялись с помощью цифровой телеметрической электроразведочной станции SGS-TEM по регулярной плотной сети. Источником нестационарного поля была генераторная петля размером 600×600 м, в которую подавался ток до 250 А. От каждого источника регистрировалось по несколько приемных петель по неравномерной сети наблюдений (Рис. 3.22а,б). Выбор параметров установки обусловлен, с одной стороны, необходимой глубиной исследований – 3–4 км, с другой – существующей 3D-сетью сейсмопрофилей 150×150 м, относительно которой размещались источник и приемники поля.



Рис. 3.22 – Схема точек зондирования становлением поля в ближней зоне (а) и схема установки (б)

В представленной схеме шаг по профилю составляет 150 м, расстояние между профилями – 150 м. Время регистрации сигналов становления – от 0.2 до 500 мс. Всего выполнено около 1450 ф. н (Рис. 3.22а).

### 3.3.4. Инверсия данных зондирования становлением поля в ближней зоне с применением пространственной невязки

На карте УЭС (Рис. 3.23а), полученной в результате применения поточечной инверсии, отмечена высокая дисперсия УЭС в рамках эффективного радиуса исследований, которая отражает в большей степени качество полевого материала (присутствие локальных «выбросов» УЭС в местах осложнения кривых ЗСБ). Вследствие применения разработанной методики осложняющие интерпретацию эффекты полностью устраняются (Рис. 3.23б). Прослеживается зональность геоэлектрических аномалий по площади. Единый подход к инверсии данных значительно снижает вероятность возникновения единичных локальных «выбросов», которые наблюдаются при применении поточечной инверсии, позволяя уменьшить влияние дисперсии на «хвостах» кривых ЗСБ.

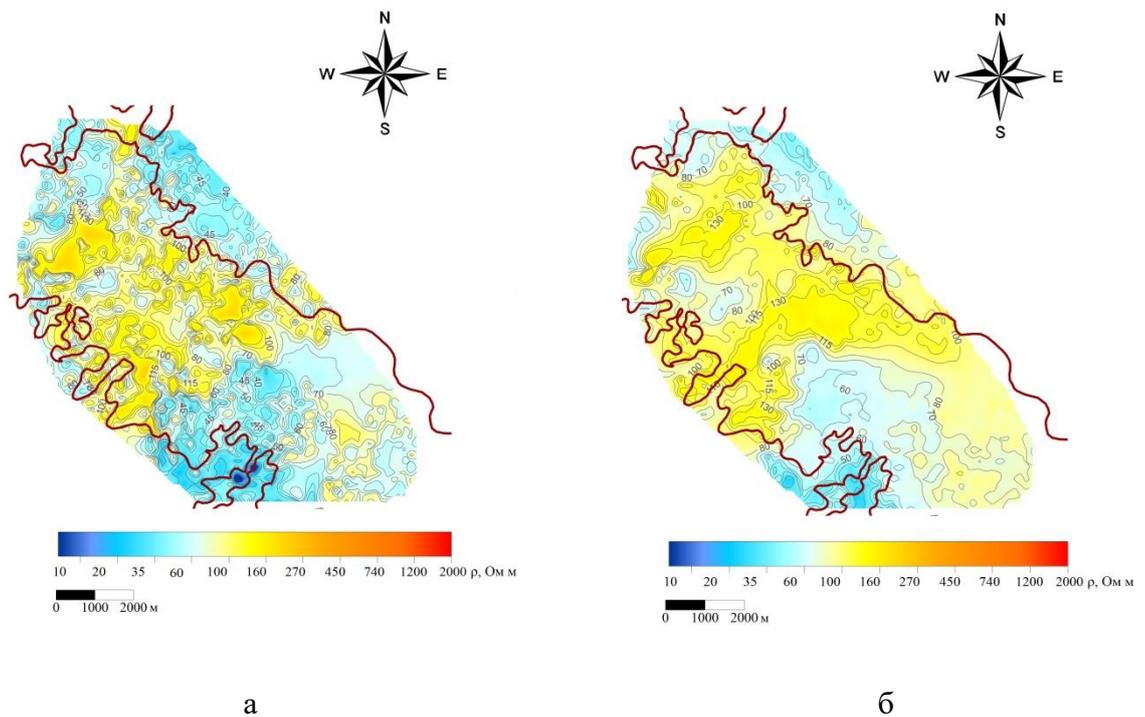


Рис. 3.23 – Результат поточечной инверсии (а) и инверсии с применением пространственной невязки (б):

1 – изолиния удельного электрического сопротивления, Ом·м; 2 – контур рифа (залежи) по МОГТ 3D.

Проведение интерпретации с применением разработанной методики совместной инверсии соседних зондирований позволяет получить уверенный результат, который в дальнейшем может использоваться для составления прогнозных карт. При поиске высокоомных объектов значительно снижается чувствительность метода ЗСБ, применение же пространственного накопления делает задачу более устойчивой, тем самым позволяя изучать высокоомные объекты.

### 3.3.5. Применение системы оценки качества и выбор результата инверсии

Для оценки качества использовались невязка и латеральная выдержанность, граничные уровни для которых были показаны ранее на Рис. 3.11

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 1 % относятся к хорошему качеству. Согласно инструкции по электроразведке, расхождения между наблюдаемыми сигналами ЗСБ при проведении контрольных наблюдений не должны превышать 5 %. Невязки в результате решения обратной задачи и в первом, и во втором случае почти идентичны (Рис. 3.24 $a_1, б_1$ ).

В качестве оценок отклонения конкретного параметра от нормы применяется средневзвешенное в радиусе стандартное отклонение. Считается, что в случае идеального ре-

шения обратной задачи отклонение  $\sigma \leq 1$ ,  $\sigma \leq 1.5$  – хорошее качество решения обратной задачи,  $\sigma \geq 2$  – задача не решена (Рис. 3.24 $a_2, b_2$ ).

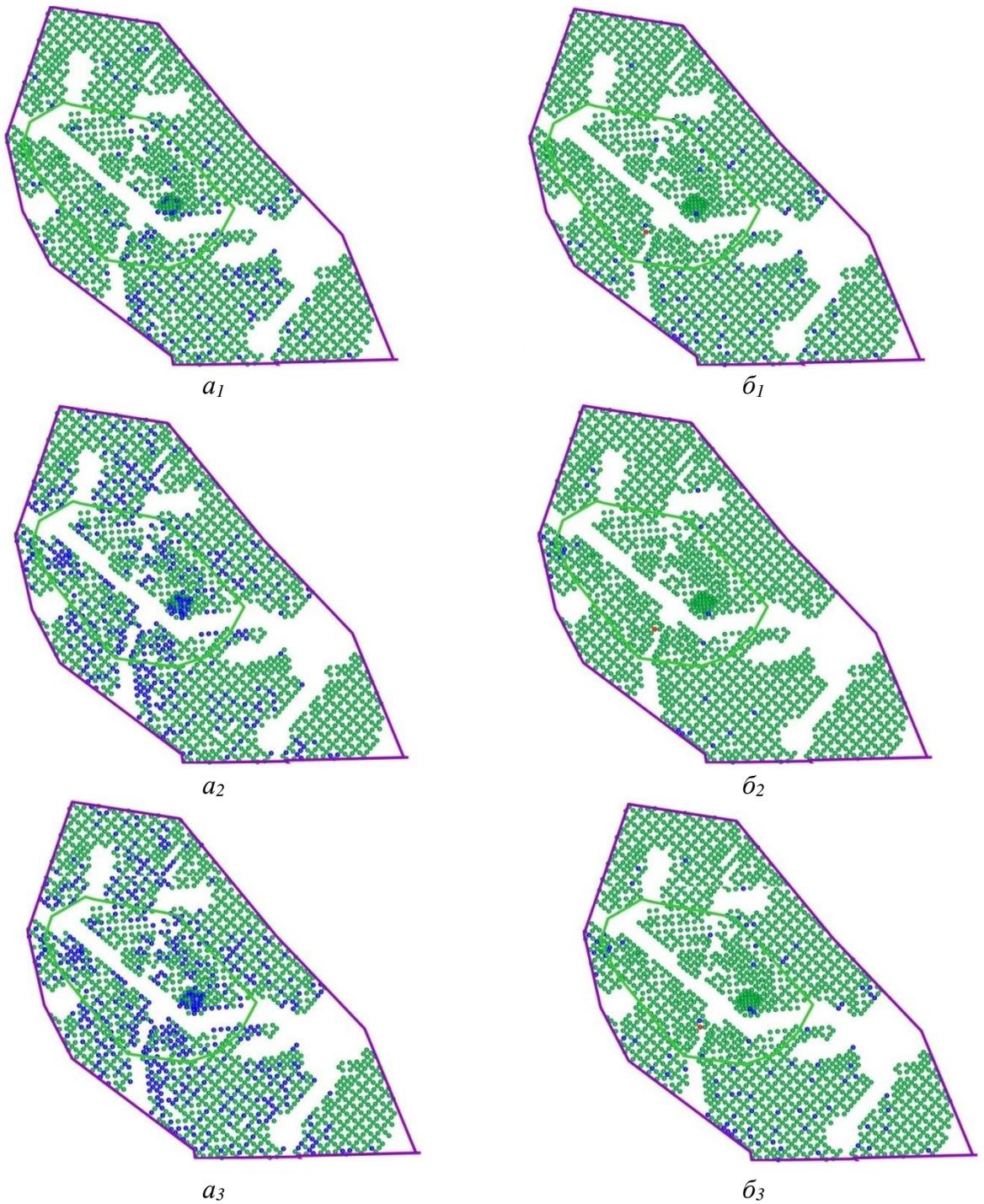


Рис. 3.24 – Результат оценки качества инверсии:

а – подход 1; б – подход 2

1 – схема невязок; 2 – схема показателя  $L$ ;

3 – схема суммарного показателя качества инверсии  $InQ$

В результате применения методики оценки качества инверсии показано, что второй вариант является более устойчивым (Рис. 3.24 $a_2, b_2$ ). Большая часть точек отнесена к хорошему качеству инверсии (Таблица 3.3).

Таблица 3.3

Средние значения качества по основным критериям

Показатель	Подход 1	Подход 2
Невязка $\delta$ , %	0.96	0.97
Латеральная выдержанность $L$	0.95	0.99
Качество инверсии $InQ$	0.96	0.98

2 Среднее значение показателя  $InQ$  выше во втором случае (0.98) (Рис. 3.24, б<sub>3</sub>), нежели в первом (0.96) (Таблица 3.3, Рис. 3.24а<sub>3</sub>). Таким образом, путем выбора наилучших невязок и оптимальной выдержанности параметра УЭС в слоях второй вариант инверсии определен как наиболее оптимальный.

### 3.3.6. Результат инверсии данных зондирования становлением поля в ближней зоне и соотношение удельного электрического сопротивления с литологическим составом и строением рифовой постройки

В результате интерпретации данных ЗСБ, выполненной в рамках закрепленного структурного каркаса удалось получить согласованную с данными сейсморазведки и бурения геоэлектрическую модель (Рис. 3.25).

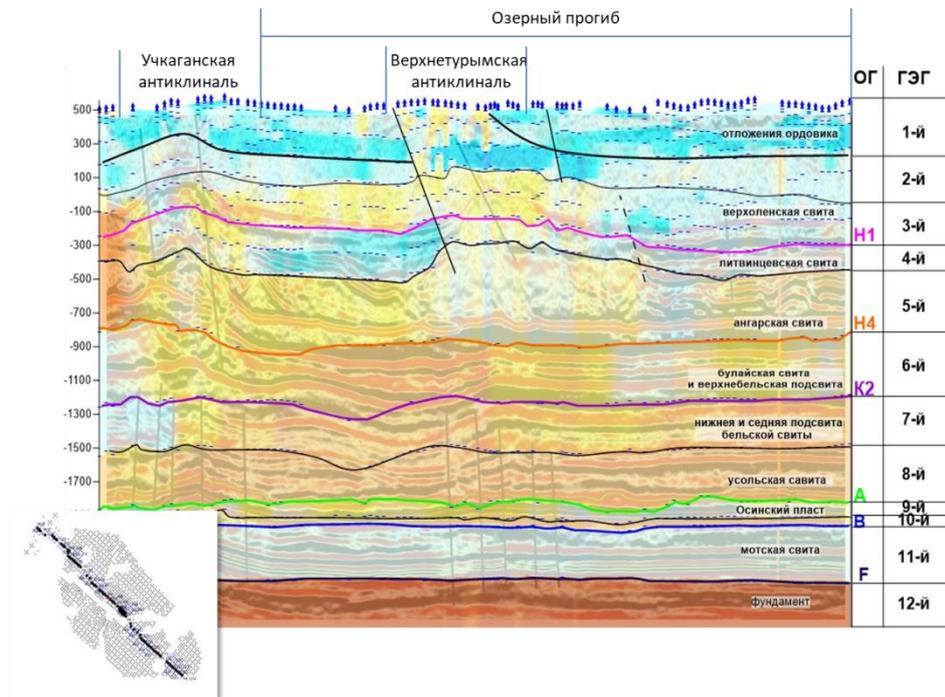


Рис. 3.25 – Совмещенный сейсмо-геоэлектрический разрез

УЭС геоэлектрического интервала, приуроченного к отложениям осинского горизонта, изменяются от 35 до 145 Ом·м (Рис. 3.26) [Бурдаков и др., 2020].

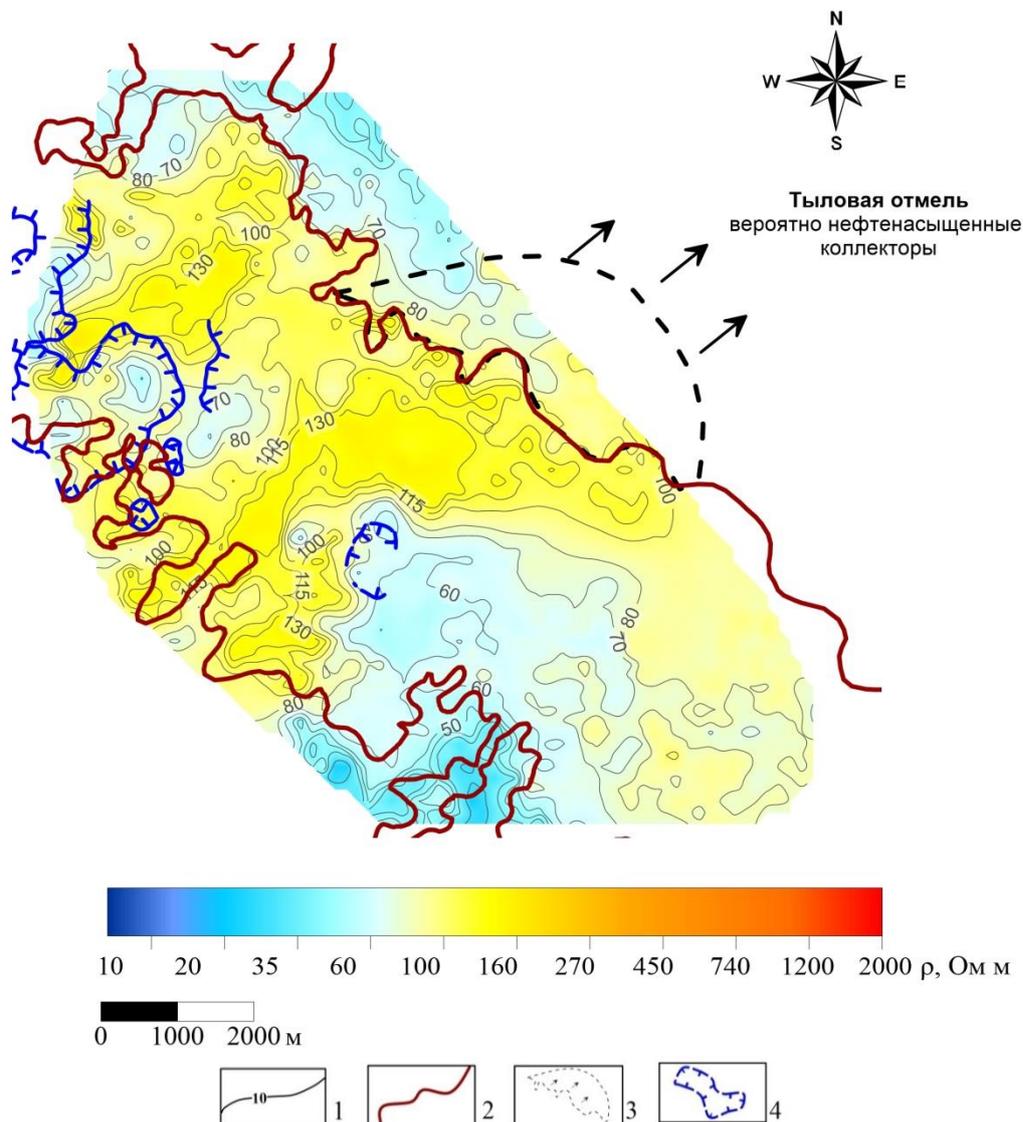


Рис. 3.26 – Карта удельного электрического сопротивления осинского горизонта по результатам интерпретации данных зондирования становлением поля в ближней зоне:

- 1 – изолинии сопротивления по данным зондирования становлением поля в ближней зоне, Ом·м.;  
 2 – контур рифа (залежи) по МОГТ 3D; 3 – прогнозный контур тыловой отмели (органогенно-обломочных отложений); 4 – контур распространения водонасыщенных толщин более 10 м

В результате комплексного анализа распределения УЭС по данным ЗСБ и информации в результате испытаний и ГИС выявлено, что на уровень УЭС продуктивного интервала влияет три фактора:

- литологическое строение коллектора и вмещающих отложений;
- наличие и соотношение нефтенасыщенных и водонасыщенных толщин;
- структурно-тектонические особенности строения разреза.

*Литологическое строение коллектора и вмещающих отложений.* Неоднородность литологического состава в зависимости от литофациальных зон сопровождается изменением УЭС (Рис. 3.26).

*Тыловая часть барьерного комплекса.* Тыловая часть барьерного комплекса изучена в северной и северо-восточной части территории исследования. По УЭС она дифференцируется на две части, которые, вероятно, связаны с двумя различными литофациаль-

ными зонами: тыловой лагуной на севере и тыловой отмелью, расположенной к юго-востоку [Бурдаков и др., 2020].

*Тыловая лагуна.* Тыловая лагуна в северной части территории исследования представлена сульфатно-карбонатными отложениями, по данным ЗСБ характеризуется пониженными значениями сопротивления 45–85 Ом·м. Данные породы характеризуются как неколлекторы.

По геоэлектрическим свойствам тыловая зона контрастно отделяется от осевой части рифа, представленной преимущественно крупными органогенными постройками и характеризующейся повышенными значениями сопротивления 100–120 Ом·м.

Контрастная граница смены геоэлектрических параметров в северо-восточной части площади уверенно согласуется с границей распространения увеличенных толщин по МОГТ, также данная граница отражает контур распространения залежи и границу распространения рифа.

*Тыловая отмель.* К юго-востоку вдоль границы залежи в пределах тыловой части барьерного комплекса прослеживается зона увеличения значений сопротивления отложений с 70 до 115 Ом·м. Зона наиболее высоких значений сопротивления – 100–115 Ом·м. Повышение значений УЭС, вероятно, связано с продолжением зоны увеличенных нефтенасыщенных толщин барьерного рифа либо с зоной распространения органогенно-обломочных отложений (грайнстоунов). Данные объекты могут характеризоваться улучшенными коллекторскими свойствами и нефтяным насыщением.

*Фронтальная часть барьерного комплекса.* Фронтальная часть барьерного комплекса изучена на юго-западе территории исследования на ширину не более 500–1500 м. Для данной зоны характерны пониженные значения сопротивления 75–85 Ом·м.

На юго-востоке, где граница фронтальной зоны вдаётся вглубь органогенной постройки на 1.5–2 км, прослеживается зона с минимальными значениями сопротивления 35–55 Ом·м. Понижение значений сопротивления, вероятно, связано с наличием зоны гидротермальной проработки пород.

*Осевая часть рифогенной постройки.* В пределах территории электроразведочных работ изучен комплекс рифовых отложений на полную ширину (около 4–5 км) протяженностью порядка 15 км. УЭС в пределах целевого объекта изменяются от 35 до 145 Ом·м.

Влияние литологического фактора на уровень значений сопротивления прослеживается в юго-восточной части территории исследования. В указанной части территории исследования, согласно данным сейсморазведочных работ, по кровле осинского горизонта прослеживаются резкие колебания и общее проседание структурной поверхности. Вероятно, данная зона сильнее остальной территории подвержена проявлению карстовых процессов, для которых характерно проявление провалов, воронок, рвов, оврагов и других

пониженных форм рельефа. Процесс карстообразования развивается по зоне распространения доломитов. Предполагается, что в процессе доломитизации происходит увеличение межзернового пространства с размером пор от 0.02–0.5 до 1–2 мм. Такие поры, гидродинамически связанные с кавернами и трещинами, по которым активно циркулировали ресурсентные растворы, Л.П. Гмид и С.Ш. Леви (1972) диагностируют как вторичные, возникшие за счет растворения, выщелачивания, доломитизации и перекристаллизации известняков. В этих случаях процесс развития вторичного доломита приводит к увеличению пористости пород.

Таким образом, одной из причин понижения УЭС коллекторов в зоне осевой части рифа являются интенсивные процессы карстообразования, развивающиеся по зонам вторичных доломитов. Наиболее интенсивно данные процессы проявлены в юго-западной части территории исследования. Можно предположить, что в указанной зоне применение гидравлического разрыва пласта и других способов интенсификации притока может значительно повлиять на дебит скважин.

В ходе работ определено, что на уровень УЭС осинского горизонта влияют три фактора: литологическое строение коллектора и вмещающих отложений, наличие и соотношение нефтенасыщенных и водонасыщенных толщин, структурно-тектонические особенности строения разреза. Выявлена закономерность распределения геоэлектрических параметров и литофациальных зон тыловой части рифогенного комплекса. По увеличению значений сопротивления выявлена зона вероятного распространения органогенно-обломочных отложений (грайнстоунов) в юго-восточной части тыловой отмели. Зона пониженных значений сопротивления 45–80 Ом·м в осевой части рифа на юго-востоке территории исследования, вероятно, связана с проявлением интенсивных процессов карстообразования, которые развиваются по зонам вторичных доломитов.

### 3.4. Оценка качества инверсии электромагнитных зондирований на примере Сибирской платформы

Для данных ЗСБ, выполненных на территории Сибирской платформы была проведена оценка качества инверсии (Рис. 3.27).

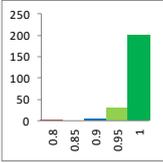
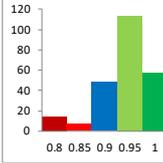
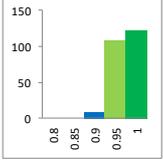
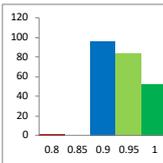
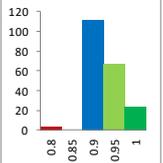
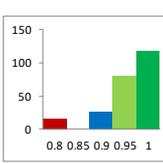
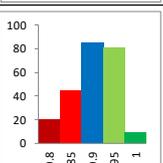
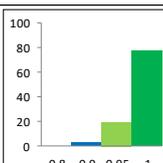
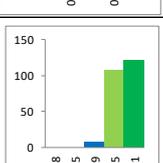
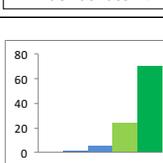
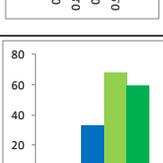
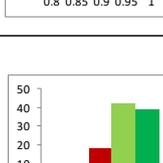
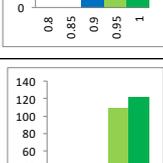
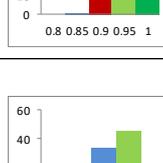
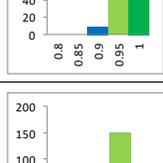
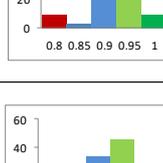
Оценка невязки проводилась для временного диапазона от 10 до 500 (до 1000) мс (в зависимости от геологических условий). Данный диапазон пригоден для совместного анализа кривых, полученных на соосных и разнесенных приемниках. Решения с невязками менее 1 % относятся к хорошему качеству. Согласно инструкции по электроразведке, расхождения между наблюдаемыми сигналами ЗСБ при проведении контрольных наблюдений не должны превышать 5 %.

В качестве оценок отклонения конкретного параметра от нормы применяется средневзвешенное в радиусе 2000 м стандартное отклонение. Оценки проводились для интервалов  $S_2$ ,  $S_3$ . 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 среднем, для участков, расположенных на территории НБА коэффициент качества инверсии  $InQ$  составляет 0.95 (Таблица 3.4). 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.

Таблица 3.4

Сводная таблица коэффициента  $InQ$ 

Участок работ	Среднее геометрическое $InQ$ (по S2, S3)	Гистограммы $InQ$	Участок работ	Среднее геометрическое $InQ$ (по S2, S3)	Гистограммы $InQ$
Верхнекатангский	0.97		Тамышский	0.93	
Верхнеджункунский	0.96		Южно-Джункунский	0.93	
Юраченский	0.9		Мирнинский	0.93	
Чулаканский	0.88		Западно-Ярактинский 2017-2022	0.98	
Кийский	0.96		Игнялинский 2012-2015	0.97	
Словутинский	0.95		Тымп-Вак	0.95	
Чаяндинский	0.95		Большетирский	0.9	
Лаушкардинский	0.92		Иктехский	0.96	



### 3.5 Выводы

На примере двух типичных участков юга Сибирской платформы показано, что применение пространственного фильтра при инверсии кривых ЗСБ в рамках квазигоризонтально-слоистых моделей повышает устойчивость решения обратной задачи

При оценках УЭС слоя статистическими методами инверсии коэффициент вариации исследуемого параметра является мерой количественной оценки качества. Показано, что 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 демонстрация его эффективности на примере эталонных нефтегазовых месторождений Восточной Сибири.

Автором предложен способ оценки ошибки определения УЭС при изучении квази-одномерного разреза осадочного чехла средствами одномерной инверсии. При определении УЭС с помощью инверсии на основе метода Монте-Карло с элементами «имитации отжига» коэффициент вариации УЭС позволяет давать оценку 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 инверсии по уровню надежности.

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А. с. № 966637. Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления / А.К. Захаркин, С.А. Пинтусов, В.Н. Шатохин. Оpubл. 15.10.1982. Бюл. № 38.
2. А. с. № 1045191. Способ геоэлектроразведки и устройство для его реализации / А.К. Захаркин, В.С. Лопатин. Оpubл. 13.09.1983. Бюл. № 36.
3. Агафонов Ю.А., Кондратьев В.А., Ольховик Е.А., Пашевин А.М., Поспеев А.В. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр. 2004. № 8-9. С. 26–28.
4. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В. Программно-измерительный комплекс для работ методом ЗСБ // Геофизический вестник. 2001. № 10. С. 8–11.
5. Агафонов Ю.А., Поспеев А.В., Суров Л.В. Система интерпретации данных и основные направления применения нестационарных электромагнитных исследований на юге Сибирской платформы // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006а. № 1. С. 33–36.
6. Агафонов Ю.А. Разработка программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе телеметрических систем наблюдения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.10. Новосибирск, 2005. 20 с.
7. Агафонов Ю.А., Суров Л.В., Шарлов М.В. Принцип работы и основные компоненты аппаратно-программного комплекса цифровой телеметрической электроразведочной станции «Пикет» // Российский геофизический журнал. 2006б. № 43. С. 98–102.
8. Алешин И.М. Статистический подход оценки качества модели, полученной в результате инверсии геофизических данных // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 4. С. 34–42.
9. Антонов, Е.Ю., Шеин А.Н. Способы повышения качества инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований при изучении поляризующихся сред // Геология и геофизика, 2008. № 10. С. 1046—1062.
10. Антонов, Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной электрической поляризации верхней части разреза восточной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 2. № 1. С. 185—191.
11. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П., Вожов В.И., Воробьев В.Н., Гольберт А.В. [и др.]. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.
12. Бакина В.В., Горина А.Б., Дмитриевский С.Л., Илюхин Л.Н., Кузнецов В.Г., Постникова О.В. [и др.]. Древние карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазонасность. М.: Научный мир, 2000. 104 с.

13. Баранов М.А., Компаниец С.В., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А. Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 7. С. 25–31.
14. Беркинблит М.Б. Нейронные сети: эксперимент. учеб. пособие. М.: МИРОС и ВЗМШ РАО. 1993. 96 с.
15. Бубнов В.М., Татаринев А.В. Способ непалеточной интерпретации кривых кажущегося сопротивления ЗСБЗ // Геология и геофизика. 1977. Т. 18. № 10. С. 137–139.
16. Буддо И.В. Тонкослоистые модели при изучении коллекторов в осадочном чехле методом зондирований становлением поля в ближней зоне – методика и результаты интерпретации (на примере юга Сибирской платформы): автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2012. 16 с.
17. Буддо И.В., Семинский И.К., Шелохов И.А., Мисюркеева Н.В., Селяев В.А. Электромагнитные методы для изучения криолитозоны в условиях Арктики: предпосылки применения и экспериментальные данные // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике: тез. докл. Междунар. конф. Салехард, 2021. С. 71–74.
18. Буддо И.В., Смирнов А.С., Мисюркеева Н.В., Шелохов И.А., Поспеев А.В., Касьянов В.В. [и др.]. Интегрирование данных электромагнитных и сейсморазведочных исследований на всех стадиях геологоразведочных работ: от поисково-оценочного этапа до разработки месторождения углеводородов // Экспозиция нефть газ. 2018. № 6. С. 24–28.
19. Бурдаков Д.А., Сибилев В.Н., Токарева О.В., Колесов В.А., Агафонов Ю.А. Мониторинг фронта заводнения карбонатных коллекторов нижнего кембрия методом 4D электроразведки // Нефтяное хозяйство. 2020. № 9. С. 30–34. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-9-30-34>.
20. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
21. Вахромеев Г. С., Давыденко А. Ю. Моделирование в разведочной геофизике: монография. М.: Недра, 1987. 191 с.
22. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М., Практическая оптимизация. Перевод с английского. / М.: Мир. 1985. 509 с.
23. Гмид Л.П., Леви С.Ш. Атлас карбонатных коллекторов. Л.:Недра, 1972.
24. Гольдорт В.Е., Исаев Г.А., Купин Д.И. и др. Портативная цифровая электроразведочная аппаратура «Импульс-Ц» // Геофизические и геодезические методы и средства исследований Сибири: сб. стат. / отв. ред. А.Г. Прихода, Б.И. Рабинович. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1979. С. 53–57.

25. Гольцман Ф.М., Калинина Т.Б. Комплексование геофизических наблюдений // Известия Российской академии наук. Серия: Физика Земли. 1973. № 8. С. 31–42.
26. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 53–60.
27. Гусейнов Р.Г. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 2015. 24 с.
28. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии / пер. с англ. В 2 т. Т. 1. М.: Недра, 1990. 319 с.
29. Емельянов В.С., Суров Л.В., Шарлов М.В., Агафонов Ю.А. Современное программное средство 1D инверсии и моделирования данных ЗСБ Model4 // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: XIII Междунар. науч.-практ. семинар. СПб., 2016. С. 115–118.
30. Емельянов В.С., Буддо И.В., Шарлов М.В., Мисюркеева Н.В., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Оценка точности определения удельного электрического сопротивления горизонтов-коллекторов по электромагнитным данным // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 133-138.
31. Емельянов В.С., Мурзина Е.В., Буддо И.В., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Подход к инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований для проводящих разрезов Западной Сибири // Вопросы естествознания. 2017. № 1 (13). С. 47-55.
32. Жданов М.С. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра. 1986. 316 с.
33. Жданов Э.Р., Маликов Р.Ф., Хисматуллин Р.К. Компьютерное моделирование физических явлений и процессов методом Монте-Карло: Учебно-метод. пособие. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2005 – 124с.
34. Жданов М.С. Теория решения обратных задач и регуляризации в геофизике / пер. с англ.; под ред. И.М. Варенцова. М.: Научный мир, 2007. 710 с.
35. Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы: монография / пер. с англ.; под ред. Е.П. Велихова. М.: Научный мир, 2012. 680 с.
36. Жемчугова В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений. М.: EAGE Геомодель, 2014. 232 с.
37. Жиглявский А.А., Жилинская А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 247 с.
38. Захаркин А.К., Бубнов В.М., Крыжановский В.А., Тарло Н.Н. Магнитная вязкость горных пород – новый осложняющий фактор метода ЗСБ // Поиск полезных ископа-

- емых в Сибири методом зондирования становлением поля. Новосибирск, СНИИГГиМС, 1988. С. 19–26.
39. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.
40. Каменецкий Ф.М., Новиков П.В., Тимофеев В.М. Использование дифференциальных трансформаций для качественной интерпретации данных электромагнитных зондирований методом становления поля // Физика Земли. 1993. № 9. С. 91–96.
41. Каменецкий Ф.М., Тимофеев В.М. О возможности разделения поляризационных и индукционных эффектов // Физика земли. 1984. № 12. С. 89–94.
42. Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен: Vela – Verlag, 2014. 58 с.
43. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. М.: ГЕОС, 1997. 161 с.
44. Каминский А.Е. Зондирование становлением поля ZondTEM1d. 2018 // ZondSoftware [Электронный ресурс]. URL: <http://zond-geo.ru/software/electromagnetic-soundings/zondtem1d> (дата обращения: 27.04.2022).
45. Кауфман А.А., Левшин А.Л. Введение в теорию геофизических методов. В 5 ч. М.: Недра, 2000.
46. Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирований становлением поля в ближней зоне. Новосибирск: Наука, 1970. 123 с.
47. Клевлеев В.М., Попов Ю.П., Кузнецова И.А. Метрология, стандартизация, сертификация: учебник для студентов. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2003. 255 с.
48. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Влияние релаксации намагниченности двухслойного полупространства на индукционные переходные характеристики // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 10. С. 1157–1170.
49. Кожевников Н.О., Снопков С.В. Магнитная вязкость траппов и ее связь с аномалиями электромагнитного поля в методе переходных процессов (Якутская кимберлитовая провинция) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 5. С. 91–102.
50. Кожевников Н.О., Снопков С.В. Суперпарамагнетизм в геоэлектрике. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1990. 32 с.
51. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии: монография. Тверь: ГЕРС, 2006. 479 с.
52. Кузнецов В.Г. Палеозойское рифообразование на территории России и смежных стран. / Российская академия естественных наук, Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина. Москва: ГЕОС, 2000. 227 с.
53. Кузнецов В.Г., Илюхин Л.Н., Постникова О.В., Бакина В.В., Горина А.Б.,

- и др. Древние карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазоносность. М.: Науч. мир, 2000. 104 с.
54. Колесников В.П. Интерпретация электрических зондирований квазигоризонтально-слоистых сред: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 04.00.12. Пермь, 1995. 37 с.
55. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. № 1. С. 35–40.
56. 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 нефтегазопроисследовательских 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>.
57. Компаниец С.В. Учет индукционно-вызванной поляризации при решении нефтегазопроисследовательских задач методом ЗСБ на юге Сибирской платформы.: дис. ... канд. геол.-минерал. Наук: 25.00.10. Иркутск, 2020. 104 с.
58. Конторович А.Э. Геология нефти и газа: избранные труды (1960–1989 гг.). Т. I. Геология нефти и газа Сибири. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2008. 540 с.
59. Конторович А.Э., Мельников Н.В., Старосельцев В.С. Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы: труды СНИИГГиМС. Вып. 222. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1975. С. 4–21.
60. Кубышта И.И., Павловский Ю.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Шакирзянов Л.Н. Применение комплексного подхода при интерпретации сейсморазведки МОГТ 3D и высокоплотной электроразведки ЗСБ для повышения успешности поисково-разведочного бурения в условиях Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2014. № 12. С. 38–41.
61. Крюкова Л. Г. Приближенный способ интерпретации зондирований становлением поля в ближней зоне // Математическое моделирование электромагнитных полей. М.: Изд-во ИЗМИРАН, 1983. С. 214–222.
62. Лопатин А.С. Метод отжига // Стохастическая оптимизация в информатике: межвуз. сб. Вып. 1. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. С. 133–149.
63. Матвеев Б.К. Электроразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 368 с.
64. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы: стратиграфия, история развития. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2018. 177 с.

65. Могилатов В.С., Захаркин А.К., Злобинский А.В. Математическое обеспечение электроразведки ЗСБ. Система «Подбор». Новосибирск: Гео, 2007. 155 с.
66. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. 208 с.
67. Могилатов В.С. Расчет поля источника, заземленного в обсаженной скважине // Геология и геофизика. 1992. № 5. С. 133–141.
68. Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.
69. Морозов В.А. Применение метода регуляризации к решению одной некорректной задачи // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 1965. № 4. С. 13–21.
70. Морозов В.А. О регуляризации некорректно поставленных задач и выборе параметра регуляризации // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1966. Т. 6. № 1. С. 170–175.
71. Морозов В.А. Регулярные методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1987. 239 с.
72. Морозов В.А. Об оптимальных методах решения некорректных задач // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2006. Т. 7. № 1. С. 105–107.
73. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Токарева О.В., Компаниец С.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. Методика применения автоматической инверсии данных 3D ЗСБ. Материалы международной научно-практической конференции GeoBaikal Иркутск.2016,а.
74. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Мисюркеева Н.В., Буддо И.В., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Результат применения автоматической инверсии для исследования многолетнемерзлых пород методом мЗСБ // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: материалы XII Междунар. науч.-практ. Семинара. СПб., 2016б. С. 119–122.
75. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Подход к оценке качества автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXVII Всерос. молодежн. конф. Иркутск, 2017. С. 159–161.
76. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Буддо И.В., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Подход к оценке ошибки решения обратной задачи // Иновации в геонауках: материалы Междунар. конф. СПб., 2018. С. 1–6.
77. Мурзина Е.В., Поспеев А.В., Буддо И.В., Шарлов М.В., Семинский И.К., Мисюркеева Н.В. [и др.]. Возможности малоуглубинных 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>.

78. 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 нефтегазопроисследовательских 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>.

79. Никитенко М.Н. Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях электромагнитного каротажа: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 2019. 340 с.

80. Панкратов В.М., Турицин К.С. Геоэлектрические модели горизонтально-слоистого разреза Непского свода // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. / отв. ред. В.И. Михалевский. Иркутск: Изд-во СНИИГГиМС, 1987. С. 131–135.

81. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектроманнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. 2011. № 2. С. 3–14.

82. Полетаева Н.Г., Турицын К.С. Геоэлектрическая модель Ярактинского месторождения // Поиск полезных ископаемых в Сибири методом зондирования становлением поля. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1988. С. 82–95.

83. Поспеев А.В., Пашевин А.М., Яговкин А.Л. Применение компьютеризованной аппаратуры СГС-ТЕМ при исследованиях методом ЗСБ. // Геофизика, 1999, спец. выпуск. С. 45–46.

84. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. 2010. № 6. С. 47–52.

85. Поспеев А.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрических моделей осадочного чехла юга Сибирской платформы. // Вестник Иркутского государственного технического университета. №5 (88).2014. С. 53–57.

86. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В. [и др.]. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018а. 231 с.

87. Поспеев А.В., Буддо И.В., Суров Л.В. К вопросу о разрешающей способности нестационарных электромагнитных зондирований при картировании горизонтов-коллекторов в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXIV Всерос. молодежн. конф. Иркутск, 2011. С. 209–210.

88. 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>.

89. Поспеев А.В., Пашевин А.М., Яговкин А.Л. Применение компьютеризированной аппаратуры СГС-ТЕМ при исследованиях методом ЗСБ // Геофизика. 1999. Специальный выпуск к 50-летию Иркутскгеофизика. С. 45–46.

90. Рабинович Б.И., Кожевников Н.О. Структурная электроразведка: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1988. 82 с.

91. Рабинович Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: конспект лекций / под ред. Н.О. Кожевникова. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1987. 52 с.

92. Самарский А.А., Вабищев П.Н., Численные методы решения обратных задач математической физики: Учебное пособие / Изд. 3-е. М.: Издательство ЛКИ, 2009. 480 с.

93. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра. 1973. 254 с.

94. Семинский И.К., Буддо И.В., Мурзина Е.В., Селяев В.А. Возможности электроразведки методом зондирования становлением поля в ближней зоне при решении нефтегазопоисковых 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>.

95. Семинский И.К., Кожевников Н.О., Буддо И.В., Мурзина Е.В., Агафонов Ю.А. Оценка областей применения различных видов инверсии данных ЗСБ // Инновации в геонауках – время открытий: материалы VIII Междунар. геолог. конф. СПб., 2018а.

96. Семинский И.К., Кожевников Н.О., Буддо И.В., Мурзина Е.В., Агафонов Ю.А. Оценка различных подходов инверсии данных ЗСБ // Инновации в геонауках – время открытий: материалы VIII Междунар. геолог. конф. СПб., 2018б.

97. Семинский И.К. Оптимизация методики ЗСБ на предполевом и интерпретационном этапах средствами 3D моделирования: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. Наук: 25.00.10. Иркутск, 2017. 24 с.

98. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.
99. Спичак В.В. Методы комплексной интерпретации электромагнитных и других геофизических данных // Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных / под ред. В.В. Спичака. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. С. 6–28.
100. Спичак В.В. Современные подходы к комплексной инверсии геофизических данных // Геофизика. 2009. № 5. С. 10–19.
101. Спичак В.В. Трехмерная байесовская инверсия // Электромагнитные исследования земных недр / под ред. В.В. Спичака. М.: Научный мир, 2005. С. 91–109.
102. Суров Л.В. Создание единой эффективной программной среды обработки, визуализации и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // II Сибирская Междунар. конф. мол. уч. по наукам о Земле: тезисы докладов. Новосибирск, 2004. С. 162–163.
103. Табаровский Л.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1988. 22 с.
104. Табаровский Л.А., Эпов М.И.. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов. // Геология и геофизика. 2006. т. 47. № 5. С. 568–578.
105. Табаровский Л.А., Эпов М.И., Сосунов О.Г. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения (теория, алгоритмы, программы). Новосибирск: Изд-во ИГГ СО АН СССР, 1985. 48 с.
106. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. 286 с.
107. Тихонов А.Н., Костомаров Д.П. Вводные лекции по прикладной математике. М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 192 с.
108. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск, Наука, 2009, 218 с.
109. Тригубович Г.М., Чернышев А.В., Куклин А.В., Ковальский Я.Ф., Сверкунов А.С. EM-DataProcessor: оперативная 3D-инверсия данных импульсной индуктивной электроразведки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2014. Т. 2. № 3. С. 95–101.
110. Токарева О.В., Мостовой П.Я, Останков А.В., Орлова Д.А., Гомульский В.В. Компаниец С.В. Возможности интеграции данных ЗСБ в геологическую модель целевых горизонтов коллекторов // Геомодель-2017: тезисы докл. конф. Геленджик, 2017.
111. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 31. № 1. С. 20–24.

112. Шарлов М.В. Интегрированная система обработки и инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 24–35.
113. Шарлов М.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Снижение влияния магнитной вязкости на результаты зондирований становлением поля в ближней зоне // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3s. С. 703–714. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0548>.
114. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско–Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина) / Г.Г. Шемин. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. – 467 с.
115. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ, 1992. 31 с.
116. Aarts E., Korst J. Simulated annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization a. neural computing. New York: Wiley Interscience, 1989. 272 p.
117. Auken E., Foged N., and Sørensen K. I., Model recognition by 1-D laterally constrained inversion of resistivity data // 9th Meeting, Environmental and Engineering Geophysical Society—European Section, 2002. P. 241–244. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406195>
118. Auken E., Christiansen A.V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data // Geophysics. 2004. Vol. 69. Iss. 3. P. 752–761. <https://doi.org/10.1190/1.1759461>.
119. Backus G.E. Bayesian inference in geomagnetism // Geophysical Journal International. 1988. Vol. 92. Iss. 1. P. 125–142. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1988.tb01127.x>.
120. Barsukov P.O., Fainberg E.B., Khabensky E.O. Shallow investigations by TEM-FAST technique: methodology and examples // Chapter 3 in «Methods in Geochemistry and Geophysics». V. 40 / Ed. V.V. Spichak. 2007, doi: 10.1016/S0076-6895(06)40003-2.
121. Bertsimas D., Tsitsiklis J. Simulated annealing // Statistical Science. 1993. Vol. 8. Iss. 1. P. 10–15.
122. Bosch M., Guillen A., Ledru P. Lithologic tomography: an application to geophysical data from Cadomian belt of northern Brittany, France // Tectonophysics. 2001. Vol. 331. Iss. 1-2. P. 197–227. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00243-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00243-2).
123. Bosch M. Lithologic tomography: from plural geophysical data to lithology estimation // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 1999. Vol. 104. Iss. B1. P. 749–766. <https://doi.org/10.1029/1998JB900014>.

124. Buddo I., Baryshev L., Pospeev A., Murzina E., Agafonov Y. Experience of seismic (CDP) and electromagnetic (TEM) joint data interpretation on the example of Kovykta gas condensate field // *GeoBaikal 2012: Conference Proceedings*. 2012. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143511>.
125. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics // *Journal of Chemical Physics*. 1941. Vol. 9. Iss. 4. P. 341–351. <https://doi.org/10.1063/1.1750906>.
126. Christensen, N. B., and Sørensen, K. I. Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations // *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 1998 Vol 3. P. 75–90.
127. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. 1987. Vol. 52. Iss. 3. P. 289–300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.
128. *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism* / eds. D. Gubbins, E. Herrero-Bervera. Dordrecht: Springer, 2007. 1054 p.
129. Gao G., Abubakar A., Habashy T.M. Joint petrophysical inversion of electromagnetic and full-waveform seismic data // *Geophysics*. 2012. Vol. 77. Iss. 3. P. WA3–WA18. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0157.1>.
130. Geman S., Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images // *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1984. Vol. PAMI-6. Iss. 6. P. 721–741. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1984.4767596>.
131. Grandis H. *Imagerie électromagnétique Bayésienne par la simulation d'une chaîne de Markov*: doctoral d'université. Paris, 1994. 278 p.
132. Habashy T., Abubakar A. A general framework for constraint minimization for the inversion of electromagnetic measurements // *Progress in Electromagnetic Research*. 2004. Vol. 46. P. 265–312. <https://doi.org/10.2528/PIER03100702>.
133. Harris P., MacGregor L. Enhancing the resolution of CSEM inversion using seismic constraints // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2007. <https://doi.org/10.1190/1.2792492>.
134. Haupt R.L., Haupt S.E. *Practical genetic algorithms*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 272 p.
135. Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 183 p.
136. Kennedy J., Eberhart R. *Particle swarm optimization* // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. 1995. Vol. 4.

137. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C.D., Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing // *Science*. 1983. Vol. 220. P. 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
138. Loe M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // *Geophysical Prospecting*. 1996a. Vol. 44. Iss. 3. P. 499–524. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00162.x>.
139. Loe M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // *Geophysical Prospecting*. 1996b. Vol. 44. Iss. 1. P. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
140. MacCalman L., O’Callaghan S.T., Reid A., Shen D., Carter S., Krieger L., et al. Distributed Bayesian geophysical inversions // *Proceedings of the 39<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, 2014.
141. MacGregor L., Tomlinson J., Cooper R. Challenges and pitfalls in multi-physics integration for reservoir characterization // *EAGE Seismic Driven Reservoir Characterization and Production Management Symposium*. Kuala Lumpur, 2015.
142. McNeill J.D. Application of transient electromagnetic techniques: technical note TN-7. Missisagua: Geonics Limited, 1980. 17 p.
143. Monteiro Santos F.A. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data // *Journal of Applied Geophysics*. 2004. Vol. 56. Iss. 2. P. 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>.
144. Moorkamp M., Heincke B., Jegen M., Roberts A.W., Hobbs R.W. A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data // *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 184. Iss. 1. P. 477–493. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04856.x>.
145. Moorkamp M., Jones A.G., Eaton D.W. Joint inversion of teleseismic receiver functions and magnetotelluric data using a genetic algorithm: are seismic velocities and electrical conductivities compatible // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34, Iss. 16. P. L16311. <https://doi.org/10.1029/2007GL030519>.
146. Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2010. Vol. 115. Iss. B4. <https://doi.org/10.1029/2009JB006369>.
147. Moorkamp M., Jones A.G., Rao C.K. Joint inversion of MT and seismic receiver function data using a genetic algorithm // *Extended Abstracts for the 18<sup>th</sup> IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth*. El Vendrell, 2006.
148. Mosegaard K., Tarantola A. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1995. Vol. 100. Iss. B7. P. 12431–12447. <https://doi.org/10.1029/94JB03097>.

149. Mota R., Monteiro Santos F.A. 2D sections of porosity and water saturation from integrated resistivity and seismic surveys // *Near Surface Geophysics*. 2010. Vol. 8. Iss. 6. P. 575–584. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010042>.
150. Murzina E.V., Emelyanov V.S., Gomulskii V.V., Pospeev A.V., Agafonov Y.A. Estimation of the oil pipeline interference for the transient electromagnetic data Interpretation (oil field production stage) // *GeoBaikal 2018: Conference Proceedings*. 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802047>.
151. Murzina E.V., Pospeev A.V., Seminskij I.K., Emel'yanov V.S., Gomul'skij V.V., Buddo I.V., et al. The inversion high-density electromagnetic sounding (3D-sounding) with space deposit // *GeoBaikal 2020: Conference Proceedings*. 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052050>.
152. Oldenburg D. W., and Li. Y., Inversion of induced polarization data // *Geophysics*. 1994. №59. P. 1327–1341.
153. Oldenburg D.W., Li Y., Aki K., Richards P.G., Alumbaugh D., Newman G., et al. Inversion for applied geophysics: a tutorial // *Investigations in Geophysics*. 2005. P. 89–150. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5>.
154. Oshmarin R.A., Ostankov A.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V. Capabilities and limitations of electromagnetic techniques in Eastern Siberia // *SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition*. 2016. P. SPE-182082-MS. <https://doi.org/10.2118/182082-MS>.
155. Patent no. 4,114,086 U. S. Inductive source method of induced polarization prospecting / A.A. Kaufman. September 12, 1978.
156. Pelton, W.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W.H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R.Sill, P.H. Nelso. // *Geophysics*. — 1978.— 43 — p.588—609.
157. Pinheiro R.V.L. Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip system, Amazon, Brazil: PhD thesis. Durham: University of Durham, 1997. 408 p.
158. Sambridge M. & Mosegaard K. Monte carlo methods in geophysical inverse problems// *Reviews of Geophysics* No. 40. Vol 3. September 2002. P.
159. Seminskij I.K., Buddo I., Agafonov U., Belaya A., Trigubovich G. Experience a combination of 1D and 3D approaches interpretation TEM-data in solving the problems of oil and gas in Eastern Siberia // *GeoBaikal 2016: Conference Proceedings*. 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601694>.
160. Spichak, V., Fukuoka, K., Kobayashi, T., Mogi, T., Popova, I. & Shima, H. Neural network based interpretation of insufficient and noisy MT data in terms of the target macro-parameters, in *Proc. 2nd Int. Symp. on 3D Electromagnetics*, eds Wannamaker, P. & Zhdanov, M., Salt Lake City, 1999, pp. 297–300.

161. Sen M.K., Stoffa P.L. Global optimization methods in geophysical inversion. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 289 p.
162. Tarantola A. Inverse problem theory. New York: Elsevier, 1987. 613 p.
163. Wisen, R., Auken, E., & Dahlin, T. Combination of 1D laterally constrained inversion and smoothin version of resistivity data with a priori data from boreholes. Near Surface Geophysics, 3(2), 71-78.