

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи

Павлова Александра Михайловна



**ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ТРЕХМЕРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Шевнин Владимир Алексеевич

Москва – 2014

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНО ПОСТРОЕННЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ.....	9
1. Искажения от трехмерных неоднородностей в двумерных данных.....	9
2. Методики изучения трехмерно неоднородных сред.....	12
Срединный градиент (СГ)	12
3D-электротомография (3D-ЭТ)	12
Метод двух составляющих (МДС) Боголюбова А.Н и ВИЭП	15
Методики исследований анизотропных сред.....	15
ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ТРЕХМЕРНОГО СТРОЕНИЯ СРЕДЫ НА ДАННЫЕ ДВУМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	17
1. Классификация трехмерных неоднородностей	18
2. Эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного объекта в данных двумерной профильной электротомографии	20
Характеристика процесса образования и развития карстово-суффозионных полостей..	21
Геофизические исследования карстово-суффозионных районов	22
Расчет и сравнение эффектов от трехмерной высокоомной неоднородности в результатах двумерной и трехмерной методик измерения с помощью математического моделирование методом МИУ	22
Результаты моделирования	24
Выводы.....	29
3. Влияние трехмерных продольных неоднородностей на данные двумерной профильной электротомографии.....	30
Режимные наблюдения методом электротомографии на гребне каменно-набросной плотины	30
Коррекция влияния продольного рельефа путем ввода коэффициентов в кажущееся сопротивление	46
4. Выводы по Главе.....	54
ГЛАВА 3. ТЕОРИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНВАРИАНТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МЕТОДА СГ	56
1. Теория пространственных инвариантов в методе ЭП-СГ	56
Зависимость кажущегося сопротивления от поляризации аномального объекта	56
Теория пространственных инвариантов	57

2. Методики измерений с двумя питающими линиями в методе ЭП-СГ	59
Традиционная и тензорная методики	59
3. Расчет аномальных эффектов от высокоомных линейных объектов разной ориентации в методе ЭП-СГ при помощи математического моделирования методом МИУ	61
Параметры модели	62
Результаты моделирования	62
4. Использование теории пространственных инвариантов при обработке данных ЭП-СГ, полученных рядом с с. Бородино	67
5. Выводы по Главе	70
ГЛАВА 4. ПСЕВДО-3D-ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ	71
1. Методики изучения 3D-сред на основе электротомографии	71
Площадная 2D-электротомография	71
3D-электротомография	72
Псевдо-3D- электротомография	73
2. Цели и задачи исследования	74
3. Методика псевдо-3D-электротомографии	76
4. Расчет эффектов от трехмерного объекта при псевдо-3D-электротомографии с помощью математического моделирования методом МИУ	78
Параметры моделирования	78
Результаты моделирования	81
5. Опыт применения псевдо-3D-электротомографии при решении задач детального геоэлектрического картирования	91
Александровское плато	92
Пойма р. Воря	99
Шекшово	106
6. Выводы по Главе	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	118

Введение

В общем случае все исследуемые геоэлектрические среды являются трехмерными. Ранее точность и детальность работ, подразумеваемая решаемой задачей, допускала использование либо одномерного приближения строения среды для исследований в условиях ровного рельефа и субгоризонтальных границ, либо двумерного приближения при изучении линейных или локальных неоднородностей, с размерами, превышающими в несколько раз шаг исследований. Однако в последнее время задачи, которые ставятся перед геофизиками, становятся значительно сложнее. Для их решения недостаточно таких приближений, и необходимо проводить исследования, учитывающее уже трехмерное строение среды. Вместе с увеличением требуемой детальности работ это приводит к усложнению методик изучения геоэлектрической среды. Разработке и оптимизации методик наблюдений и способов обработки данных для коррекции искажений и посвящена моя диссертационная работа.

Актуальность

Большинство разработанных и успешно применяемых в настоящее время модификаций метода сопротивлений предполагает приближенное одномерное или двумерное строение среды. При изучении сложно построенных трехмерных геоэлектрических сред такими методами, в результатах измерений возникают искажения. Они влекут за собой некорректную интерпретацию и неверное геологическое истолкование результатов. Для получения корректного результата необходимо либо совершенствовать способы подавления этих искажений, либо развивать трехмерные методы исследования, в которых искажения будут нести полезную информацию.

Актуальными для развития являются оба направления. Двумерные методики измерений в общем случае лучше развиты, проще в реализации, дешевле и производительнее трехмерных. К тому же они имеют меньше ограничений по расположению сети наблюдений. Поэтому исследования эффектов от трехмерных неоднородностей в двумерных данных дают возможность улучшить результат интерпретации и минимизировать вероятность ошибочных выводов без перехода к более сложной трехмерной методике измерений или при сложных полевых условиях с ограничением сети наблюдений.

Трехмерные методики изучения, в свою очередь, очевидно, лучше подходят для изучения трехмерных сред при необходимой высокой детальности и точности. Поэтому их разработка и оптимизация также актуальна в настоящее время. Такие методики предполагают: трехмерные сети наблюдений (в общем случае, площадные), 3D-аппаратуру и оборудование для ускорения измерений, алгоритмы автоматической 3D-инверсии для решения обратной задачи. В настоящее время геофизики во всем мире активно разрабатывают специализированную аппаратуру и

работают над оптимизацией уже существующих алгоритмов решения обратной задачи в трехмерном варианте. Моя работа в этом направлении посвящена разработке сети наблюдений, направленной на получение оптимального результата в зависимости от поставленной задачи и предполагаемого строения изучаемой среды. Описанная в моей работе технология псевдо-3D-электротомографии, является сейчас наиболее успешной разработкой по совокупности таких факторов, как производительность, качество получаемого результата, скорость и простота производства полевых работ и обработки. Кроме того, на начальном этапе развития 3D-аппаратуры, немаловажным преимуществом методики является возможность использования давно существующей аппаратуры для 2D-электротомографии.

Профилирование методом СГ также позволяет изучать трехмерно неоднородные среды. Этот метод является незаменимым на стадии поиска и локализации аномальных участков, так как позволяет быстро проводить измерения на больших площадях. Как любая методика профилирования, метод СГ наиболее чувствителен к горизонтальным неоднородностям разреза, поэтому позволяет выявлять положение аномальных объектов в плане и достаточно точно описывать горизонтальную геометрию. В дальнейшем для оценки глубинного строения подробно каждую аномалию можно изучать отдельно с привлечением более детальных методов исследования. В моей работе рассматриваются методики с двумя положениями питающей линии для каждого планшета. Переход от одной питающей линии к двум перпендикулярным существенно повышает качество результатов: увеличивается точность оценки сопротивления в аномальных зонах, увеличивается точность описания горизонтального положения локальных объектов и появляется возможность картировать линейные высокоомные объекты любой ориентации.

Также в настоящее время активно увеличивается объем работ по режимным наблюдениям с участием геоэлектрических методов. Система для режимных наблюдений, описанная в работе и разработанная при непосредственном участии автора, позволила успешно решить все поставленные задачи по наблюдению за состоянием линейной каменно-набросной плотины (КНП) в сложных технических условиях производства полевых работ. Система является основой для создания технических и методологических рекомендаций по построению специализированной сети наблюдений, обработке данных и комплексированию методов при геоэлектрическом мониторинге.

Цели и задачи

Целью работы является анализ и оптимизация существующих методик исследования сложно построенных трехмерно-неоднородных сред и оценка их эффективности при получении геолого-геофизической модели среды. В рамках каждого направления стоят свои задачи.

Влияние трехмерного строения среды на данные двумерных измерений. Предложить классификацию трехмерных неоднородностей. Определить типы искажений, возникающие при

влиянии трехмерных неоднородностей на данные двумерных измерений, предложить способы минимизации таких искажений. Оценить эффективность способов минимизации. Построить систему режимных наблюдений для мониторинга состояния конкретного гидротехнического сооружения – каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС. На фоне искажений от влияния продольных неоднородностей оценить возможность построения корректной геоэлектрической модели (разреза) и возможность выявления локальных аномалий. Оценить эффективность предложенной системы режимных исследований при выявлении зон фильтрации в теле плотины.

Метод СГ. Рассмотреть тензорную методику съемки, оценить ее эффективность в сравнении с традиционной методикой с двумя поляризациями. Определить зависимость полученных результатов от азимута двух взаимно перпендикулярных питающих линий – насколько хорошо проявляются на карте СГ объекты различной формы и ориентации.

Псевдо-3D-электротомография. Оптимизировать методику псевдо-3D-электротомографии, а именно: технологию сбора, обработки, интерпретации данных и получение геологического результата. Определить, для каких задач и моделей среды целесообразно применять эту методику, какие в каждом случае существуют проблемы, изучить пути их решения. Оценить возможность и целесообразность применения 2-х перпендикулярных систем профилей. Выявить наличие зависимости результата от выбранного азимута параллельных профилей и отношения между шагом по профилю и между профилями. Провести моделирование и полевые эксперименты для оценки эффективности методики для разных моделей среды и объектов с разной контрастностью и геометрией.

Научная новизна

1. Предложена классификация основных типов трехмерных неоднородностей по их пространственным параметрам. Описаны эффекты, возникающие в данных двумерной профильной электротомографии при влиянии неоднородностей разного типа согласно классификации. Предложены способы подавления искажений.

- 1) Выявлен эффект ограничения глубины нижней границы локального трехмерного объекта при проведении автоматической двумерной инверсии со стандартным набором параметров по профилю электротомографии непосредственно над объектом.
- 2) Выявлен эффект искажения от влияния продольного рельефа в данных двумерной электротомографии по профилю. Предложен способ подавления влияния стороннего продольного рельефа на данные двумерной электротомографии по продольному профилю путем ввода полученных на основе моделирования коэффициентов в кажущееся сопротивление. Предложено подавлять искажения от любых продольных

неоднородностей с помощью построения разностных разрезов при режимных наблюдениях за состоянием каменно-набросной плотины (КНП) Богучанской ГЭС.

- 3) Показана высокая эффективность системы режимных наблюдений при выявлении зон фильтрации в теле КНП Богучанской ГЭС. Выявлены и описаны две основные причины постепенного снижения удельного электрического сопротивления: 1) таяние мерзлых включений и субвертикальная фильтрация и 2) «растепление» и обводнение основания.

2. Доказано, что методика ЭП-СГ с 2-мя перпендикулярными поляризациями позволяет надежно выявлять линейные объекты произвольной ориентации. Это подтверждено результатами моделирования и полевыми исследованиями.

3. Разработана методика псевдо-3D-электротомографии, включающая построение сети наблюдений, граф обработки и визуализации результатов. Выработаны основные рекомендации по выбору ее параметров и описан ряд возможных ограничений.

- 1) Предложено использование 2-х перпендикулярных систем профилей в методике псевдо-3D-электротомографии.
- 2) Выявлено наличие зависимости результата от параметров сети наблюдений (выбранного азимута параллельных профилей и отношения между шагом по профилю и между профилями).

Практическая значимость

Рассмотрены методики исследования трехмерно-неоднородных сред, для каждой методики отмечены достоинства и недостатки, определены условия их применимости и эффективность для разных моделей сред.

Обнаружен важный для интерпретации эффект ограничения глубины нижней границы трехмерного локального объекта при двумерной электротомографии по профилю.

Предложено проводить режимные наблюдения на основе электротомографии для мониторинга состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС. Разработанная система показала высокую эффективность при выявлении фильтрационных процессов. Показана принципиальная возможность наблюдать развитие различных фильтрационных процессов с помощью предложенной системы мониторинга и определять их происхождение.

Предложен быстрый способ коррекции влияния стороннего продольного рельефа на данные двумерной электротомографии по продольному профилю.

Доказаны преимущества проведения съемки ЭП-СГ в двух взаимно перпендикулярных поляризациях произвольного азимута и обработке с использованием теории пространственных инвариантов.

Разработана и успешно опробована методика псевдо-3Д-электротомографии, которая может успешно применяться для решения широкого круга инженерных, структурных и археологических задач.

Личный вклад автора

Я участвовала в разработке и анализе теоретических исследований, на которых основана работа, самостоятельно выполнила все описанные в работе модельные расчеты, спланировала и провела экспериментальные исследования и обработку результатов, принимала непосредственное участие в полевых работах и/или обработке данных по всем производственным объектам исследований, представленным в работе в качестве примеров.

Апробация

Всего по теме диссертации было сделано 16 докладов на конференциях. Результаты работы докладывались на VI-X Международных научно-практических конференциях «Инженерная и рудная геофизика», Геленджик, Россия 2010-2014 гг., Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2009» и молодёжной конференции «Планета Земля-2009», Москва, Россия 2009 г. А также на конференциях за рубежом – Near Surface-2012-2013 18-19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Paris, France, 2012 and Bochum, Germany 2013. Основные выводы изложены в 9 опубликованных работах, среди которых 4 статьи в реферируемых журналах, включенных в список ВАК. Также частично результаты исследований были включены в бакалаврскую и магистерскую диссертации автора (на правах рукописи: Павлова А.М., 2009; Павлова А.М., 2011).

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 135 названий работ отечественных и зарубежных авторов, включает 128 страниц текста, 58 иллюстраций и 9 таблиц.

Защищаемые положения

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Предложена классификация типов трехмерных объектов, основанная на их форме и расположении относительно профиля наблюдений. Выявлены и описаны искажения геоэлектрического разреза, возникающие при изучении сред с трехмерными неоднородностями различного типа с помощью двумерной электротомографии по профилю (эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного объекта и эффект от влияния продольного рельефа при двумерной электротомографии по профилю).
2. Предложено два пути коррекции искажений от влияния продольных неоднородностей на данные двумерных измерений: ввод рассчитанных на основе моделирования коэффи-

циентов в кажущееся сопротивление и анализ разностных разрезов при режимных циклических наблюдениях. На примере режимных исследований КНП Богучанской ГЭС показана эффективность обоих способов коррекции при исследовании трехмерной среды на основе двумерной электротомографии по профилю.

3. Доказано, что при использовании двух перпендикулярных питающих линий в методе СГ форма и амплитуда аномалий инвариантов кажущегося сопротивления от линейных высокоомных объектов не зависит от их ориентации.

4. Предложено использование 2-х перпендикулярных азимутов профилей в методике псевдо-3D-электротомографии. Показана высокая эффективность методики при изучении сложно построенных трехмерных сред различной контрастности.

Благодарности

Выражаю самую глубокую благодарность:

- Шевнину В.А. за научное руководство мной, помощь при поиске и анализе материалов, на основе которых была создана работа, а также за чуткость и терпеливое отношение к автору на протяжении всего времени общения и научного руководства;

- Ерохину С.А. за веру в автора и благополучное завершение работы, положительные эмоции, терпение и поддержку в сложные моменты, помощь и участие во всех этапах проведения большинства исследований;

- Козлову О.В. за интересные идеи и научные консультации по многим аспектам работы и неиссякаемое доброжелательное отношение к автору;

- Стойновой А.М. за неоценимую помощь в создании и коррекции текста работы и иллюстраций и важную поддержку на последних этапах работы;

- Бобачеву А.А. за конструктивную критику, помощь с моделированием и разъяснение научных основ всей работы;

- Модину И.Н. за азы геофизического образования и полезные советы;

- Макарову Д.В., Ялову Т.В., Тамбергу А.С., Груздеву А.И., Шишкиной Т.В., Пелевину А.А., Толстову П.С., Баранцевой О.А., Молотовщиковой Т.А., Скобелеву А.Д. за участие в полевых работах и обработке данных при проведении экспериментов;

- Ильину М.М., Савичу А.И. за возможность заниматься научной работой и предоставленные материалы;

- Акуленко С.А., Большакову Д.К., Ивановой С.В., Марченко М.Н. за ценные советы и помощь в работе;

- маме Павловой Г.Н., а также Тосе и Жасе за умение создать комфортные рабочие условия;

- папе Павлову М.В. и деду Павлову В.А. за стимул к научному труду.

Глава 1. Обзор геоэлектрических методов исследования сложно построенных неоднородных сред и тенденции их развития

В общем случае исследуемые электроразведочными методами реальные среды являются трехмерно-неоднородными $\rho=\rho(x,y,z)$, а двумерное или одномерное приближение таких сред не всегда может обеспечить достаточную точность и часто может привести к неправильной интерпретации. Поэтому существует много различных попыток расширить и оптимизировать эти методы для изучения таких трехмерно неоднородных по сопротивлению сред.

В последнее время, как в нашей стране, так и по всему миру, активно ведутся научные исследования, направленные на развитие и оптимизацию методов для изучения трехмерно-неоднородных сред. Это касается и методологической базы, и алгоритмов обработки, и программных и аппаратурных комплексов.

Все методики можно разделить на две группы в зависимости от цели конкретного исследования. Первая объединяет методики, направленные на изучение конкретно трехмерных объектов, их свойств и геометрических характеристик. Во вторую, наоборот, входят методики, построенные для подавления искажений, вызванных трехмерной неоднородностью среды, с тем, чтобы дальнейшая интерпретация осуществлялась в рамках двумерной (или одномерной) модели.

И в основных главах настоящей диссертационной работы также внимание уделяется не только развитию методик для непосредственного изучения 3D-сред, но и некоторым способам подавления 3D-искажений. Поэтому более подробно каждую группу целесообразно рассматривать отдельно, уделяя большее внимание близким к содержанию диссертации аспектам.

1. Искажения от трехмерных неоднородностей в двумерных данных

Методы ВЭЗ и ЭП существуют на протяжении 100 лет и являются одними из самых распространенных и простых методов изучения сред в электроразведке (Хмелевской В.К., 1984; Куфуд О., 1984; Жданов М.С., 1986; Блох И.М., 1971; Колесников В.П., 2007). Помехи и искажения кривых ВЭЗ, создаваемые двумерными и трехмерными объектами, также давно и подробно изучаются во всем мире (Модин И.Н., 2010; Электрическое зондирование..., 1988; Электрическое зондирование..., 1992; Электроразведка..., 1994; Кусков В.В., 1979; Dahlin T., 1996), а на кафедре геофизики Геологического факультета МГУ входят в курсы лекций и семинаров (Электроразведка..., 2005; Шевнин В.А., Павлова А.М., 2010). Для выявления, оценки и подавления некоторых искажений были разработаны методики и способы обработки с использованием различных трансформаций результатов измерений (Модин И.Н., 2010; Электроразведка...,

1994). Исходя из этого, можно заключить, что эффекты от двумерных неоднородностей в одномерных данных хорошо изучены и классифицированы. В то же время при постепенном переходе от 2D к 3D-съемке и развитию 3D-алгоритмов решения прямой задачи в данный момент стало актуальным изучение влияния 3D-неоднородностей на двумерные измерения.

Трехмерными в общем случае будут считаться, как локальные трехмерные объекты, так и двумерные объекты, ось которых не перпендикулярна профилю. В этой области имеет смысл обозначить две проблемы, исследованию решения которых посвящена Глава 3 настоящей диссертационной работы.

Первая проблема – искажения, вызванные использованием 2D-электротомографии и 2D-инверсии при изучении непосредственно трехмерных объектов. К этим искажениям относятся, в основном, искажения формы и/или контрастности аномалии от целевого трехмерного объекта в результатах двумерной съемки, возникновение сопряженных с ней ложных аномалий и т.п. Значительные искажения такого рода встречаются, например, при исследованиях локальных карстово-суффозионных процессов (Cuevas Castellanos P. et al, 2013; Куэвас Кастельянос П. и др., 2013; Ерохин С.А. и др. 2011), а также при изучении археологических объектов (Ерохин С.А., Павлова А.М, 2012; Morelli A. et al, 2004) и обследовании различных инженерных сооружений. В связи с этим интерес к трехмерным эффектам в данных двумерных исследований и сравнению 2D и 3D-съемки достаточно велик, и этой теме посвящено много научных исследований и практических результатов (Nimmer R.E. et al, 2008; Johansson B. et al, 2007; Козлова Е.А., 2010; Dahlin et al, 2007; Yang X., Lagmanson M., 2006). Авторы сходятся в том, что 3D-инверсия в случае наличия трехмерных объектов в области исследования дает лучшие результаты, чем 2D. Но такой способ обработки возможен при наличии нескольких двумерных профилей электротомографии на участке исследований, а часто профиль бывает только один. Поэтому в настоящее время вопрос о надежном способе подавления искажений, вызванных трехмерным характером изучаемой неоднородности в двумерных данных, до конца не решен. Здесь оптимальным подходом является, по-видимому, усовершенствование алгоритмов инверсии и тщательный подбор ее параметров, которое происходит в настоящее время (Loke M.H., Lane J.W., 2002; Lines L.R., Treitel S., 1984; Loke M.H., 1996-2009; Каминский А.Е., 2001-2010; Pidlisecky A., Knight R., 2008).

Вторая проблема – искажения, вызванные влиянием различных нецелевых трехмерных неоднородностей на профильные данные двумерной электроразведки методом сопротивлений (преимущественно ЭТ). Здесь речь идет об искажениях-помехах, требующих подавления. Такая ситуация особенно часто возникает при профильных исследованиях вдоль или при пересечении линейных двумерных объектов, например: на гребне и бермах плотин с продольным рельефом, по берегам рек и каналов, при пересечении или вдоль инженерных коммуникаций, ж/д дорог

и.т.п. Для получения корректного геоэлектрического разреза необходима какая-либо коррекция результатов. Давно развита мощная теоретическая математическая и статистическая база для обработки геофизических сигналов, и существует большое количество способов подавления помех и искажений и различных методов фильтрации (Никитин А.А., Петров А.В., 2008; Опенгейм А., Шафер Р., 2007; Никитин А.А., 1977; Никитин А.А., 1986; Бат М., 1974 - перевод 1980; Turcotte D.L., 1997). Поэтому существует достаточно много способов коррекции и геоэлектрических данных на разных этапах обработки (Светов Б.С., Пискун П.В., 2005; Ritz M. et al, 1999; Бобачев А.А. и др., 1995; Бобачев А.А. и др., 1996), которые могут справляться с подобными искажениями. В частности, для подавления искажений в данных метода сопротивлений наиболее простым и быстрым оказался способ корректировки кажущегося сопротивления на основе решения прямой задачи (Vickery A., Hobbs V., 2002), использованный авторами для минимизации эффектов от инженерных коммуникаций. Основное достоинство метода: в процесс подавления включена информация о происхождении искажения и не происходит подавления полезной информации. Именно на него обращено особое внимание в диссертации.

Кроме того, подавление таких искажений возможно косвенным образом при режимных наблюдениях (под режимными наблюдениями здесь понимаются многократные периодические измерения по единой сети наблюдений на одном и том же объекте). В последние годы в рамках режимных наблюдений геоэлектрические методы начали более активно, чем раньше, применяться в исследованиях, в особенности, на линейных грунтовых плотинах (Dahlin T. et al, 2009; Sjödaahl P., 2006; Sjödaahl P. et al, 2008; Козлов О.В, Павлова А.М., 2013; Boleve A. et al, 2009; Большаков Д.К. и др., 2012; In-Ку Cho et al, 2013). Большинство плотин с точки зрения геофизики имеет трехмерное строение среды, поскольку плотина обычно обладает а) продольным рельефом и б) неоднородностью внутреннего продольного строения. И часто при этом проведение исследований возможно только на ее гребне. В этом случае плотины – это объект, при исследовании которого в данных по 2D-профилю электротомографии возникают искажения. Их подавление происходит при расчете разностных моделей между разными циклами наблюдений, поскольку все постоянные искажения (искажения от постоянно присутствующих на профиле или рядом с ним объектов) в этом случае вычитаются друг из друга. Очевидно, что подавление искажений становится возможным только при условии, что искажение постоянно во времени, а задачей исследования является изучение какого-либо временного процесса, проявляющегося в изменении геоэлектрических свойств. Такими процессами являются: заложение оползней в теле плотины, развитие в нем фильтрационных процессов, постепенный размыв и нарушение целостности структурных элементов и изменение прочностных характеристик.

2. Методики изучения трехмерно неоднородных сред

Срединный градиент (СГ)

Электроразведка в комплексе с магниторазведкой успешно применяется во всем мире при археологических изысканиях (Франтов Г.С., Пинкевич А.А., 1966; Глазунов В.В., 1997; Станюкович А.К., 1994; Ерохин С.А., Кац М.Я. и др., 2010; Erokhin S.A. et al, 2010; Szalai S. et al, 2001). Для решения задач картирования археологических объектов чаще проводятся измерения методом двумерной электротомографии (ЭТ) (Ерохин С.А., Павлова А.М., 2012), однако в последнее время наблюдается тенденция перехода к трехмерному варианту ЭТ, о чем будет сказано ниже. А вот для поиска двумерных и трехмерных объектов на площади хорошо подходит метод срединного градиента (СГ), поэтому он также является одним из часто применяемых методов в комплексных электроразведочных исследованиях в археологии.

Как в нашей стране, так и за рубежом, в нем используются две перпендикулярные питающие линии для различной поляризации аномальных объектов (Горбунов А.А. и др., 2001; Модин И.Н. и др., 2006; Simon A., 1974; Di Fiore B. et al, 2002; Bibby H.M., 1977; Bibby H.M., 1986). Результаты обработки совокупности измерений для двух питающих линий с разным азимутом обладают значительно большей эффективностью по сравнению с результатами наблюдений СГ с одной питающей линией. В такой модификации метод широко применяется для обнаружения объектов культурного наследия в верхней части разреза (Большаков Д.К. и др., 2009; Павлова А.М., 2009; Ерохин С.А., Модин И.Н. и др., 2012; Szalai S., 2011). В 2008 году у венгерских геофизиков возникла идея обобщить теорию этого метода и проводить двухкомпонентные измерения с двумя приемными линиями для каждой ориентации питающей линии с последующим расчетом инвариантов (Varga M. et al, 2008). Используя полевые примеры и результаты физического моделирования, они показали, что методика с двумя приемными линиями очень сильно теряет в производительности практически без выигрыша в точности (Varga M. et al, 2008). Эти выводы были подтверждены результатами численного моделирования (Павлова А.М., 2009), более подробно они описаны в Главе 3.

3D-электротомография (3D-ЭТ)

Самыми удачными попытками оптимизации электроразведочных измерений для изучения трехмерных сред, стали методики, в основе которых лежит метод электротомографии (СП 11-105-97, 2004; Бобачев А.А. и др., 2007). В распространенной в настоящее время терминологии электротомография – это методика, направленная на изучение двумерно-неоднородных сред, то есть 2D-электротомография, выполняемая по профилю. Она является наиболее эффективной технологией в методе сопротивлений, используемой при детальном исследовании (Бобачев

А.А. и др., 1996; Dahlin T., Zhou B., 2004; Dahlin T., Zhou B., 2006). Однако возросший в последнее время интерес к изучению 3D-объектов вместе с появлением и интенсивным развитием многоэлектродных многоканальных аппаратурных систем и алгоритмов 3D-инверсии (Dahlin T., Bernstone C., 1997; Loke M.H., Barker R., 1996; Loke M.H., 1996-2009; Papadopoulos N. et al, 2011; Каминский А.Е., 2001-2010; Pidlisecky A. et al, 2008; Pidlisecky A. et al, 2007; Gunther T., Rucker C., 2011; Neyamadpour A., 2010; Park S.K., Van G.P., 1991; Petrick Wm.R.Jr. et al, 2003) способствовал развитию различных методик сбора и обработки данных для изучения непосредственно трехмерно-неоднородных сред, каждая из которых может называться 3D-электротомографией. Поэтому понятие 3D-электротомографии до сих пор не определено точно.

Специфику каждой методики определяет различие между пространственными подходами к исследованию трехмерно неоднородной среды. Попытка разделить по этому принципу обозначенные выше методики привела к следующей классификации.

1. *Электротомография, площадная 2D-съемка.* Это съемка по 2D-профилям с последующей 2D-инверсией по каждому. Трехмерная модель в этом случае строится преимущественно графическими или интерполяционными методами. Например, в работе Ekinçi Y.L. и Kaşka M.A. (2007) описаны результаты съемки над археологическими объектами – захоронениями, где было сделано несколько параллельных профилей 2D-электротомографии, и каждый был проинтерпретирован в рамках 2D-модели, а трехмерная модель была построена интерполяционными методами с использованием математических функций для осреднения данных.

2. *Электротомография, 3D-съемка.* По моему мнению, именно этот вариант измерений можно справедливо назвать трехмерной электроразведкой. Такая съемка представляет собой измерения сигнала на приемных линиях разного азимута для разных положений питающего электрода (примеры схемы наблюдений можно найти в работах: Loke M.H., 1996-2009; Yang X., Lagmanson M., 2006; Павлова А.М., 2011; Cosentino P.L. et al, 2008). Такая съемка физически наиболее корректна при исследованиях трехмерных сред, а получение геоэлектрической модели среды осуществляется по результатам 3D-инверсии.

Исследования в этой области показывают, что 3D-съемка подразумевает огромное количество измерений и требует много времени на измерения и последующую обработку (Yang X., Lagmanson M., 2006; Павлова А.М., 2011). Кроме того, могут возникать проблемы с измерением очень низких сигналов при использовании в площадном протоколе измерений нелинейных измерительных установок (Павлова А.М., 2011).

Группа геофизиков из Италии предприняла попытку уменьшить это время путем разработки новой технологии измерений, названной ими MYG (Cosentino P.L. et al, 2008). Эта технология подразумевает использование в протоколе ограниченного числа измерительных установок и предназначена для многокомпонентных площадных измерений методом 3D-

электротомографии. Основными ее достоинствами является существенное повышение производительности и скорости измерений и значительное уменьшение количества питающих электродов (что особенно важно, например, при исследовании хрупких и ценных объектов культурного наследия) без потери разрешающей способности в сравнении с обычными традиционными установками. Авторы успешно опробовали свою разработку на нескольких археологических объектах (Cosentino P.L. et al, 2008; Cosentino P.L. et al, 2009).

3. *Электротомография, псевдо-3D-съемка.* Этот подход подразумевает съемку по 2D-профилям и последующую 3D-инверсию по всему объему данных. Чаще всего, хотя и не всегда, псевдо-3D-съемка подразумевает систему параллельных 2D-профилей, это упрощает выполнению измерений и обработку. Благодаря относительной простоте методики, которая почти не отличается от методики двумерной томографии, подобные исследования широко распространены и в настоящее время активно развиваются.

Dahlin и Loke описали, как можно успешно применять эту методику для выявления 3D-неоднородностей среды, используя моделирование (Dahlin T., Loke M.H., 1997), а Yang и Lagmanson оценили эффективность этой методики по сравнению с полноценной многокомпонентной 3D-съемкой и описали их сравнительные достоинства и недостатки (Yang X., Lagmanson M., 2006). Они показали, что при правильном построении сети наблюдений такая методика дает лучшие результаты по сравнению с 2D-съемкой и практически не теряет информативности по сравнению с 3D-съемкой. В статье (Dahlin T. et al, 2007) авторы привели результаты сравнения 3D- и 2D-инверсии для набора данных по площадной сети параллельных 2D-профилей на основе синтетических и полевых данных: при прочих одинаковых условиях (шаг между электродами, размер слоев, затухание и т.п.) 3D-инверсия показывает лучшие результаты по контрастности и разрешающей способности.

Особенно развитию псевдо-3D-съемки способствуют исследования для решения археологических задач, где применение этой методики оправдано необходимой высокой детальностью измерений и заведомо трехмерным строением изучаемой среды (Mauriello P. et al, 1998; Papadopoulos N.G. et al, 2007; Pavlova A.M., Shevnin V.A., 2013; Drahor M.G., 2007; Compare V. et al, 2009; Morelli A. et al, 2004). Но и помимо археологии существует множество полевых и модельных исследований, вносящих вклад в развитие псевдо-3D-съемки (Myeong-Jong Yi et al, 2002; Chambers J.E. et al, 2011; Chambers J.E. et al, 2009). А для выполнения подобной съемки на застроенных территориях в условия ограниченной сети наблюдений Chavez-Hernandez предложил при 3D-измерениях использовать L-установку (Chavez-Hernandez G., 2011), при которой измерительный профиль имеет изогнутую форму.

Метод двух составляющих (МДС) Боголюбова А.Н и ВИЭП

Для изучения сложно построенных сред можно измерять также две горизонтальные компоненты электрического поля перпендикулярными приемными линиями. Основное преимущество таких измерений – в возможности более точно описать поведение горизонтальной составляющей электрического поля, что позволяет определять неоднородности в горизонтальном направлении даже в стороне от непосредственной точки записи. В методах ВЭЗ и ЭП эта идея была развита Боголюбовым А.Н., создавшим на ее основе метод двух составляющих (МДС). Суть его заключалась в измерении и продольной (радиальной), и перпендикулярной (азимутальной) составляющих поля и анализе их соотношения (Боголюбов А.Н., 1972; Боголюбов А.Н. и др., 1984). Этот метод позволял выделять 2D и 3D неоднородности в области профиля ВЭЗ или ЭП, оценивать размеры и положение аномальных объектов, используя номограммы.

Альтернативное развитие идеи определения компонент вектора было реализовано на кафедре геофизики Геологического факультета МГУ с начала 1990-х годов в рамках метода векторных измерений электрического поля (ВИЭП) (Электроразведка..., 1994; Modin I.N. et al, 1994). Метод ВИЭП используется и в настоящее время для картирования горизонтального положения 2D- и 3D-объектов (Геоэкологическое обследование..., 1999; Модин И.Н., 2010). Помимо расчленения разреза в горизонтальном направлении по данным ВИЭП, Горбуновым А.А. был предложен способ оценки глубины нижней кромки аномального объекта, т.е. способ расчленения разреза по данным ВИЭП в том числе и по глубине (Горбунов А.А., 2001).

Методики исследований анизотропных сред

Зачастую при исследованиях сложно построенных сред эффект анизотропии оказывает существенное влияние на данные, и его необходимо учитывать, поскольку любое проявление анизотропных свойств увеличивает размерность и степень неоднородности среды. Кроме того, выделяют три причины анизотропии: тонкую слоистость, трещиноватость и ориентированную зернистость, – и целью исследований может являться обнаружение анизотропии и определение ее характера и свойств. Явление анизотропии известно давно (Schlumberger С., 1933; Семенов А.С., 1975), но способы его изучения продолжают развиваться в настоящее время (Изучение анизотропии..., 2012; Перваго Е.В., 1998).

Преимущественно предметом изучения является анизотропия сопротивлений в горизонтальном направлении, и основным методом являются азимутальные измерения с различной конфигурацией установок. Было обнаружено, что нелинейные установки более чувствительны к анизотропии (Семенов А.С., 1975; Bolshakov D.K. et al, 1998). Также было показано, что несимметричное вращение установок позволяет разделять эффекты от анизотропии и двумерных или

трехмерных неоднородностей в области изучения (Watson K., Barker R., 2010). Группа исследователей на кафедре геофизики Геологического факультета МГУ предложила изучать явление анизотропии комплексно, используя не только распространенные измерения методом сопротивлений, но и в том числе с помощью азимутальных дипольных индукционных зондирований (ДИП) (Шевнин В.А. и др., 2013). Эти исследования помогли выявить определенные различия для гальванического и индуктивного возбуждения и измерения поля. Также в последнее время возрос интерес к анизотропии в методе естественного поля (ЕП). В частности, предложена новая методика изучения анизотропии гидравлических свойств пород по азимутальным измерениям градиента ЕП для трещиноватых пород (Wishart D. et al, 2006; Wishart D. et al, 2008). Было показано, что она имеет лучшее разрешение по направлению фильтрации, чем измерения методом сопротивлений. Эта методика также успешно опробована для рыхлых песчано-глинистых пород поймы реки (Шевнин В.А. и др., 2013; Шевнин В.А. и др. 2012; Shevnin V.A. et al, 2013).

Глава 2. Влияние трехмерного строения среды на данные двумерных измерений

Эта Глава моей диссертационной работы посвящена разработке простейшей классификации различных типов трехмерных объектов и рассмотрению способов минимизации их влияния на результаты двумерных геоэлектрических измерений.

Проблема влияния 2D- и 3D-неоднородностей на данные методик исследования горизонтально-слоистых сред (одномерные измерения) существует давно. К настоящему моменту она уже достаточно подробно изучена в рамках традиционных электрических зондирований, описаны различные типы таких искажений, предложены методы их выявления и подавления. Также частично преодолеть ее позволило развитие метода 2D-электротомографии, предназначенного для изучения двумерно неоднородных сред, который получил широкое распространение в последнее время. Вместо подавления искажений, возникающих от 2D-неоднородностей разреза, электротомография дает возможность извлекать из них полезную информацию о строении изучаемой среды.

Однако сейчас происходит дальнейшее развитие методик электроразведки и постепенный переход от методик с двумерным приближением геоэлектрической среды к методикам, направленным уже на изучение непосредственно трехмерного строения. Он сопряжен с более сложной и узкой темой: влияние трехмерного строения на данные двумерных исследований. Эта проблема стоит менее остро, чем проблема влияния трех- и двумерного строения на данные одномерных измерений, однако ее актуальность постоянно растет. Она появляется, когда исследуемая среда заведомо трехмерная, а полевые условия накладывают существенные ограничения на методику наблюдений, и существуют только локальные участки, на которых можно проводить геоэлектрические исследования с заземлением электродов. И часто в таких случаях невозможно проведение трехмерной съемки на площади, но есть возможность проводить двумерные профильные геоэлектрические наблюдения (в основном, комбинирование электрического зондирования и профилирования или электротомографию). Кроме этого, 2D-съемка экономически существенно более выгодна, чем 3D-съемка, а это является основным фактором, определяющим объемы и методику работ, в том числе и при изучении трехмерных сред.

Итак, трехмерная структура среды в изучаемой области при двумерных геоэлектрических измерениях часто встречается:

- при археологических изысканиях;
- при инженерных геофизических изысканиях в зонах городской застройки,
- при работах на гидротехнических сооружениях,

- при исследованиях вблизи рек, каналов и других водоемов или непосредственно на них (акваторные методы),
- при исследованиях в условиях горного рельефа;
- в иных случаях, когда среда трехмерна, а выбор двумерной методики измерений обусловлен иными факторами (например, экономическим).

В рамках двумерного подхода при наличии очевидной и существенной трехмерной неоднородности среды коррекцию ее влияния на данные желательно проводить до решения обратной задачи (инверсии или иных способов). Этот шаг обработки может проводиться на этапе фильтрации данных наряду с отбраковкой, сглаживанием, осреднением или другими типами трансформаций поля. Полный учет или по крайней мере минимизация влияния трехмерных неоднородностей на данные геоэлектрических измерений – важный элемент обработки данных, но ему в настоящее время в электроразведке уделяется недостаточно внимания.

1. Классификация трехмерных неоднородностей

Предлагаемая мной классификация трехмерных неоднородностей была создана для решения конкретной задачи: определить характер их влияния на данные двумерных измерений. Поэтому она основана на пространственных характеристиках неоднородностей относительно выбранного положения профиля измерений. Система координат выбрана также в соответствии с положением профиля: ось X – вдоль профиля, ось Y – перпендикулярно ему, ось Z – вниз. Отмечу, что принципиальным в этой системе координат является только расположение осей X и Y относительно главной оси неоднородности, направление оси Z соответствует глубине, поэтому выбрано вниз, направление осей X и Y выбрано так, чтобы базис был правой тройкой векторов. Если ось Z соответствует, например, абсолютным отметкам и направлена вверх, направления осей X и Y также можно переопределить.

Общая суть проблемы такова. Объем исследуемой среды, имеющий влияние на результаты измерений, зависит от выбранного метода исследования и конфигурации используемой установки, подчиняясь, строго говоря, одному основному правилу: чем больше разнос, тем больший объем среды вокруг обозначенной точки записи, как в глубину, так и по горизонтали, имеет влияние на данные. Профильные исследования методом электротомографии подразумевают двумерное математическое приближение геоэлектрической среды $\rho=\rho(x,z)$. То есть предполагается, что структура среды вне точки зондирования или вне линии профиля электротомографии является неизменной по оси Y и подчинена выбранной приближенной модели. Если одновременно реальная среда внутри влияющего объема является трехмерной $\rho=\rho(x,y,z)$, ее неоднородности будут вносить искажения в измеренное поле. Если не учитывать влияние этих ис-

кажающих факторов, есть риск получить в результате ложные аномальные эффекты, и неверное их истолкование приведет к построению ошибочной геологической модели.

С точки зрения выбранной двумерной модели все трехмерные неоднородности отличает наличие зависимости распределения сопротивления в среде от координаты Y . На основе этого признака, очевидно, каждый ограниченный по оси Y объект с аномальным сопротивлением по отношению к вмещающей среде будет являться трехмерной неоднородностью. В основном, к ним будут относиться все локальные изометричные объекты, расположенные в любом месте относительно профиля внутри влияющего объема. Но также в заданной системе координат к ним будут относиться и некоторые двумерные объекты (или линейно вытянутые трехмерные объекты, которые можно в модели с определенной точностью аппроксимировать двумерными). Для того чтобы двумерную неоднородность можно было считать истинно двумерной в заданной системе координат, ее главная ось (вдоль которой она бесконечно вытянута), должна быть перпендикулярна линии профиля ($\alpha=90^\circ$), то есть вытянута вдоль оси Y . А при иных значениях α в заданной системе координат все двумерные неоднородности будут считаться трехмерными.

На основе изложенного выше составлена классификация трехмерных неоднородностей (Табл. 2.1 Классификация трехмерных неоднородностей. Рис. 2.1).

Табл. 2.1 Классификация трехмерных неоднородностей.			
Пространственная характеристика неоднородности (на чем основано отличие от других типов)	Двумерные неоднородности, расположенные вдоль профиля, $\alpha=0^\circ$	Двумерные неоднородности, расположенные под углом $\alpha \neq 90^\circ$, $\alpha \neq 0^\circ$ к профилю	Собственно трехмерные неоднородности
Дальнейшая терминология (как будут называться)	Продольные неоднородности	Пересекающие неоднородности	Трехмерные неоднородности

Для определенности терминологии в ней, следует сформулировать некоторые понятия, которые будут использоваться в дальнейшем описании. Двумерные неоднородности, которые вытянуты вдоль оси Y , то есть поперек профиля, будут называться *поперечными неоднородностями*. Двумерные неоднородности, которые вытянуты вдоль оси X , то есть вдоль профиля, будут называться *продольными неоднородностями*. А двумерные неоднородности, расположенные под углом $\alpha \neq 90^\circ$, $\alpha \neq 0^\circ$ к профилю, - *пересекающими неоднородностями* (Табл. 2.1, Рис. 2.1).

В моей работе уделено внимание изучению влияния двумерных неоднородностей, расположенных вдоль профиля (продольных). В общем, такие неоднородности будут проявляться на разрезе как одномерная составляющая, то есть постоянное вдоль профиля искажение.

Двумерные неоднородности, расположенные под углом (пересекающие), подробно в данной работе не изучались. Однако стоит отметить, что попытки вращения двумерного профиля относительно неоднородности в среде, предпринятые в других исследованиях, показывают, что форма и амплитуда искажений на разрезе зависит от угла поворота (Козлова Е.А., 2010).

Собственно трехмерные неоднородности - это широкий класс объектов. Внутри него можно создавать свои классификации на основе, например, реально встречающихся типов объектов. Анализ влияния таких объектов лучше начинать после постановки конкретной задачи, когда понятна конфигурация самого трехмерного объекта (оценки его свойств и геометрии) и цели исследования.

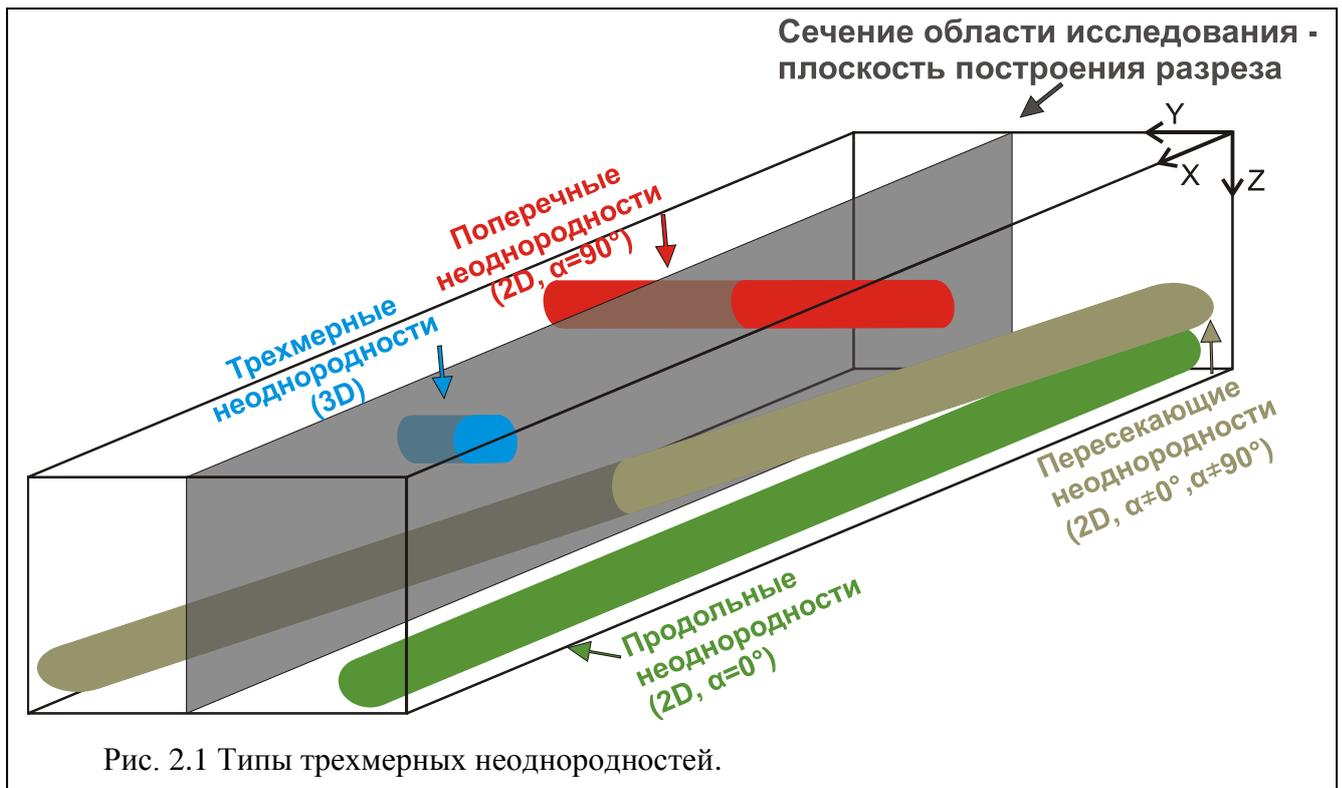


Рис. 2.1 Типы трехмерных неоднородностей.

Я рассматриваю непосредственно только два частных случая влияния трехмерной неоднородности среды на данные двумерных исследований, встречающихся при геоэлектрических изысканиях. Каждый основан на реальном полевом примере, с которым я столкнулась в своих исследованиях. В одном случае сама неоднородность является целью исследования, во втором – помехой.

2. Эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного объекта в данных двумерной профильной электротомографии

Один из принципиально важных эффектов влияния трехмерного строения объекта на результаты двумерных измерений был выявлен при решении задачи поиска опасных карстово-

суффозионных полостей методами электроразведки. Искажение, вызванное здесь влиянием трехмерности среды, относится к самому целевому исследуемому объекту – карстовой полости.

Характеристика процесса образования и развития карстово-суффозионных полостей

Карстовые и суффозионные провалы, хотя они вызываются разными процессами, имеют определенное сходство и причиняют немалый вред в городах, населенных пунктах и даже на отдельных участках в сельской местности.

Карст возникает преимущественно вследствие постепенного химического растворения различных пород подземными водами. Образование карста, т. е. системы полостей в растворимых породах, приводит к нарушению внутреннего строения всего объема пород и часто проявляется в изменении рельефа местности. К тому же массив закарстованных пород приобретает совершенно иные геотехнические и гидрогеологические свойства в сравнении с массивом тех же пород, не затронутым растворяющим воздействием движущихся подземных вод.

Суффозия – это вынос мелких минеральных частиц породы фильтрующейся через неё водой. Процесс близок к карсту, но отличается от него тем, что суффозия является преимущественно физическим процессом и частицы породы не претерпевают дальнейшего разрушения. При механической суффозии наблюдается увеличение пористости и уменьшение механической прочности пород. Суффозия приводит к проседанию вышележащей толщи и образованию западин (суффозионных воронок, блюдец, впадин) диаметром до 10 и даже 100 метров.

В карбонатных и гипсоносных песчано-глинистых отложениях и мергелях карст и суффозия могут проявляться одновременно.

Для развития подземных карстово-суффозионных пустот, ведущих к последующему образованию провалов, необходимо сочетание трех условий:

- породы склонные к разрушению (химически или механически),
- движение подземных вод,
- вынос продуктов разрушения.

Образование провала (проседания) может являться завершающим этапом нескольких похожих сценариев. Первый - образование подземной пустоты относительно большого размера и обрушение свода; второй - объемная деградация горного массива (образование многочисленных каверн и трещин, уменьшение несущей способности горного массива), механическое разрушение массива и обрушение приповерхностной толщи; третий - деградация минерального скелета (увеличение пористости, уменьшение механической прочности) и уплотнение массива под весом вышележащей толщи.

Карстовые и суффозионные провалы обнаруживаются как в России, так и за рубежом. Например, в исследованиях в Калужской области я принимала личное участие (Ерохин С.А. и

др. 2011), а при исследованиях в Гватемале помогала проводить численное моделирование (Cuevas Castellanos P. et al, 2013; Куэвас Кастельянос П. и др., 2013). В частности, именно события в Гватемале послужили стимулом для исследований, в которых на основе результатов численного моделирования был выявлен эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного объекта в методе сопротивлений.

Геофизические исследования карстово-суффозионных районов

Провалы могут образоваться в любом месте на огромной территории, и наибольшую опасность они представляют в городах. Поскольку геофизические методы могут обнаруживать растущие карстовые провалы, постепенно движущиеся к поверхности земли, задача прогноза карстовых и суффозионных процессов до момента образования провала на поверхности ставилась перед геофизиками неоднократно. С помощью моделирования можно выявить величины аномалий геофизических полей над провалами. Однако практическая реализация геофизического прогноза все еще встречает большие сложности, особенно, на застроенных территориях, где мало места для изучения и велик уровень разнообразных помех. Поэтому пока не известно случаев точного обнаружения провалов до момента их обрушения.

Как отмечалось ранее, информация о провалах в столице Гватемалы послужила стимулом для того, чтобы выявить возможности электроразведки методом сопротивлений (в частности, метода профильной 2D-электротомографии) для прогноза опасных подземных полостей до их обрушения.

Для определения величины и геометрии аномалий, возникающих при образовании отдельной подземной полости, с помощью численного моделирования была решена прямая задача в варианте 3D.

Расчет и сравнение эффектов от трехмерной высокоомной неоднородности в результатах двумерной и трехмерной методик измерения с помощью математического моделирование методом МИУ

Для решения поставленных задач было проведено трехмерное численное математическое моделирование в программе IE3R1 (Инструкция к программе IE3R1, 1991). Алгоритм программы подразумевает расчет прямой задачи методом интегральных уравнений (МИУ) (Смирнова Т.Ю., 1994; Модин И.Н., 2010) для различных электроразведочных установок над средой с трехмерным распределением удельного электрического сопротивления.

Основная идея моделирования заключается в том, что среда (модель) является трехмерной ($\rho = \rho(x, y, z)$), а источник точечным, то есть поле имеет математически трехмерный характер. Таким образом, моделируются условия, максимально приближенные к реальным измерениям при

полевых исследованиях. В конкретном случае измерения, которые призвано симулировать моделирование, – это одиночный профиль двумерной электротомографии.

Обычно обработка данных для получения геоэлектрической модели по профилю ЭТ проводится с помощью 2D-инверсии. Математически этот способ решения обратной задачи обладает меньшей размерностью (двумерная модель $\rho=\rho(x,z)$), чем реальная трехмерная среда и модель среды при моделировании в выбранном трехмерном варианте (IE3R1). Поэтому двумерная инверсия данных трехмерного моделирования позволяет оценить ошибки, возникающие при исследовании конкретной 3D-модели среды при аппроксимации ее двумерной моделью. В то же время 3D-инверсия системы нескольких профилей над той же 3D-моделью дает возможность сравнить результаты 2D- и 3D- подходов к измерениям и обработке над одной и той же трехмерной средой.

Основной стартовой моделью при моделировании была модель вертикального параллелепипеда с различным глубинным положением верхней и нижней кромок (модель «Провал»):

- горизонтальные размеры полости 40 м x 40 м;
- глубины положения нижней кромки (при фиксированном положении верхней на 6 м): 13 м, 37 м, 60 м, 100 м;
- глубины положения верхней кромки (при фиксированном положении нижней на 100 м): 6 м, 13 м, 37 м, 60 м;
- сопротивление вмещающей среды 50 Ом·м;
- сопротивление «полости» 5000 Ом·м.

Параметры съемки, заданной при симуляции измерений в программе, соответствовали методике 2D-электротомографии по профилю, проходящему непосредственно над центром неоднородности:

- шаг по профилю 5 м;
- длина профиля 340 м (центр профиля также расположен непосредственно над центром неоднородности);
- измерения с трехэлектродной комбинированной установкой Шлюмберже $A_m n + m n B$ с разносами АО от 7.5 м до 122.5 м.

Также для сравнения результатов 2D- и 3D-инверсии над выбранной моделью было проведено моделирование по 7 параллельным профилям по той же схеме наблюдений. Расстояние между профилями составляло 10 м: помимо центрального профиля непосредственно над объектом по 3 профилям в каждую сторону. Положение верхней и нижней границ при этом было зафиксировано на глубинах 13 м и 100 м соответственно.

Результаты моделирования

Все геоэлектрические разрезы получены после двумерной инверсии со стандартными параметрами в программе Res2DInv (Loke M.H., 1996-2009). По совокупности данных 7 параллельных профилей была проведена 3D-инверсия также со стандартными параметрами в программе Res3DInv (Loke M.H., 1996-2009). Стандартный набор параметров считается оптимальным в автоматической инверсии, и чаще других используется на начальных этапах интерпретации, особенно, при отсутствии априорной информации.

Геоэлектрический разрез, являющийся вертикальным сечением полученной трехмерной модели по линии над центром аномалии, сравнивался с результатом двумерной обработки. Линия плоскости сечения совпадает с линией центрального профиля 3D-электротомографии и линией профиля 2D-электротомографии при моделировании.

Стоит отметить, что модель обладает резкими границами и достаточно высокой контрастностью сопротивлений (2 порядка), а инверсия предполагает численное нахождение наиболее гладкого решения. При наличии резких высококонтрастных границ в процессе инверсии на всех разрезах вокруг основной аномалии и по краям области моделирования возникают «компенсационные» сопряженные аномалии (Рис. 2.2, Рис. 2.3, Рис. 2.4). Они преимущественно имеют небольшую амплитуду, но могут быть как пониженного, так и повышенного сопротивления по отношению к сопротивлению вмещающей среды в модели.

Качественная оценка результатов проводилась путем простого визуального анализа полученных разрезов и сравнения их с начальной моделью. Количественно отличие между результирующим геоэлектрическим разрезом и стартовой моделью характеризовалось величиной невязки. Она была рассчитана по формуле:

$$d\rho = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{\text{модель}}^i - \rho_{\text{инверсия}}^i|}{N \cdot \rho_{\text{модель}}^i} \cdot 100\% \quad 2.1$$

Результаты расчетов приведены в Табл. 2.2.

Параметры модели	стартовой модели	Верхняя кромка 6 м				Нижняя кромка 100 м			
		Нижняя кромка				Верхняя кромка			
		13 м	37 м	60 м	100 м	6 м	13 м	37 м	60 м
Невязка после 2D-инверсии		11.8%	29.1%	37.2%	36.9%	36.9%	32.1%	21%	0.7%
Невязка, модели после 3D-инверсии		-	-	-	-	-	26.7%	-	-

Видно, что для фиксированной верхней границы на 6 м невязка увеличивается вместе с понижением положения нижней кромки: чем она ниже, тем больше результат инверсии отличается от стартовой модели. Хотя для 60 м и 100 м она почти не отличается (37.2% и 36.9%), по-видимому, аномалия на разрезе становится фиксированной формы и контраста, и дальнейшее погружение границы даст аналогичные результаты.

Для фиксированной же нижней границы на 100 м невязка уменьшается вместе с понижением положения верхней кромки. Это частично связано с уменьшением искажений, а частично с ограниченной глубинностью исследований. Как показывают результаты инверсии, максимальная глубинность оказывается около 50 м. И, например, при положении верхней и нижней границ объекта на 60 м и 100 м мы вообще не должны его «видеть» - мы его и «не видим» (невязка составляет 0.7%) (Рис. 2.2).

Оценка точности определения отдельно каждого параметра начальной модели по данным моделирования и последующей инверсии для простоты я рассчитывала по формуле:

$$P_{\%} = \frac{|P_{\text{модель}} - P_{\text{инверсия}}|}{P_{\text{модель}}} \cdot 100\% \quad 2.2$$

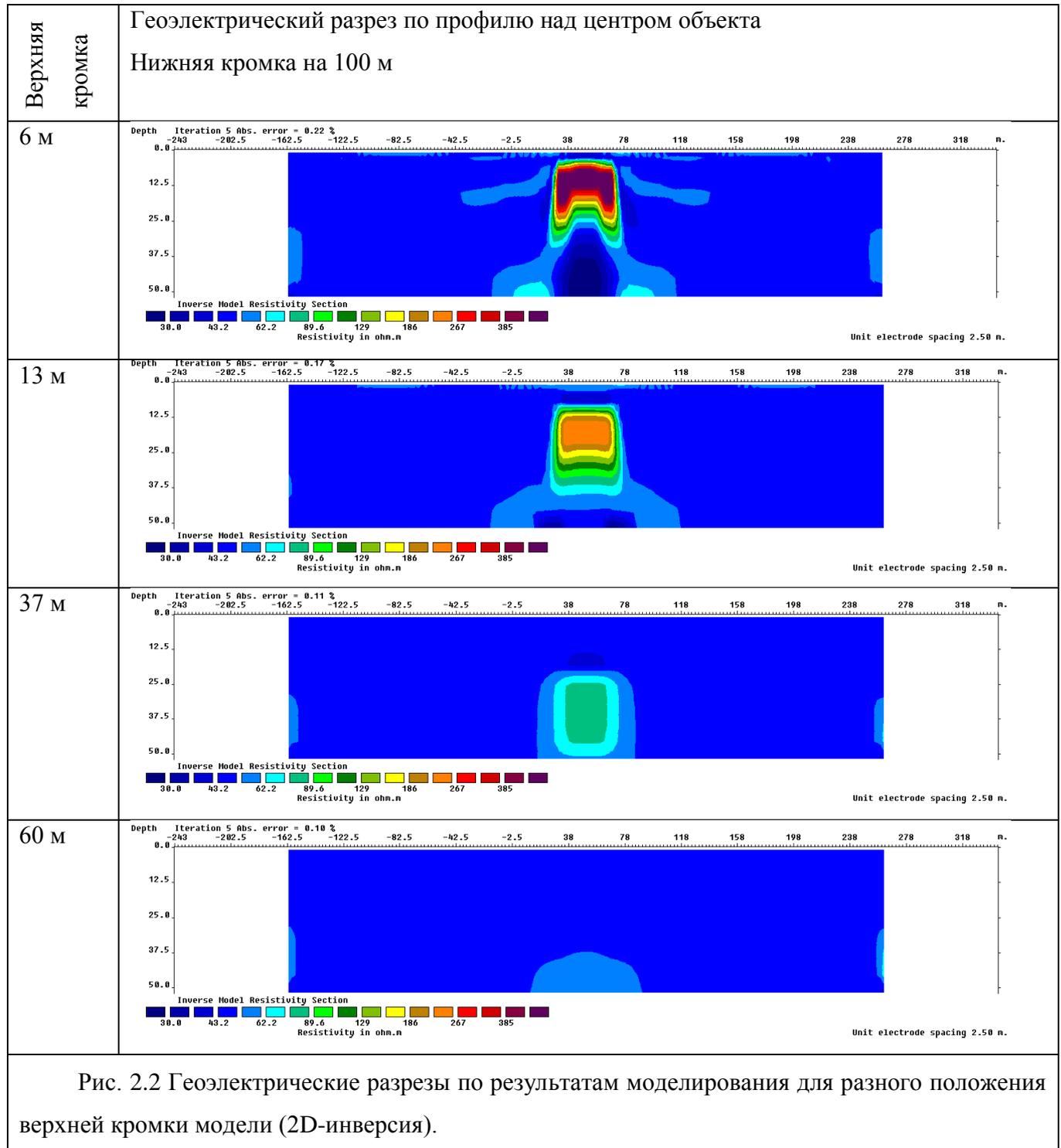
где в качестве P может быть подставлен любой параметр модели: например, сопротивление объекта в какой либо точке или среднее сопротивление по какой-либо области, глубина верхней или нижней кромки, положение горизонтальных границ и т.п.

Эта формула использует данные визуального интерпретационного анализа и не дает объективной оценки качеству каждой модели отдельно, но дает возможность сравнивать их между собой. Стоит также принять во внимание, что вычисление точности положения границ по данной формуле зависит от субъективной оценки интерпретатора, а для расчета средних значений сопротивления по области (например, для оценки сопротивления вмещающей среды) – от размеров области моделирования.

Сопротивление вмещающей среды на всех разрезах восстанавливается хорошо (Рис. 2.2, Рис. 2.3): оно численно равно заданному в модели (50 Ом·м) с точностью 2.6%, причем наибольшую ошибку вносят области с сопряженными аномалиями. Также хорошо восстанавливается горизонтальное положение объекта, точность определения горизонтальных размеров объекта менее 5 %.

Точно определить сопротивление высокоомного объекта при такой большой контрастности (100 раз) не представляется возможным. Однако можно отметить, что при положении верхней кромки на 6 м для всех моделей на разрезах (в том числе на сечении результатов трехмерной инверсии - Рис. 2.4) максимально сопротивление в аномальной области достигает 600 и даже 1200 Ом·м (Рис. 2.2), что при УЭС вмещающей среды в 50 Ом·м составляет примерно 12 и 24 раза соответственно. При погружении верхней кромки контрастность, восстанавливаемая по инверсии, постепенно уменьшается: при 13 м максимум составляет 250 Ом·м (5 раз), при 37 м –

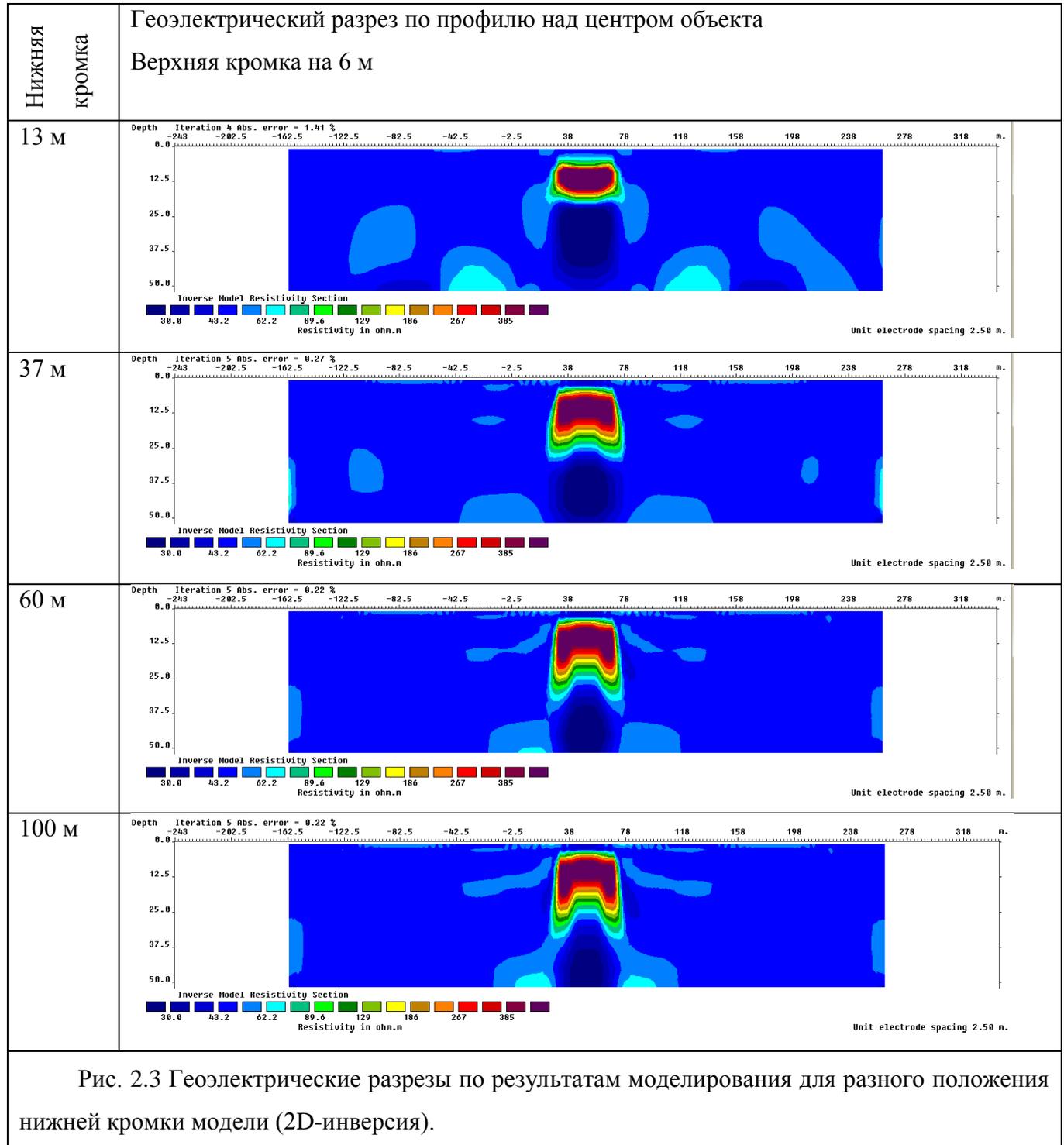
80 Ом·м (1.6 раза), а при 60 м – всего 65 Ом·м (1.3 раза). В последнем варианте при верхней кромке на 60 м величина аномалии оказывается сравнимой с амплитудой сопряженных ложных аномалий (и даже ниже). Это значит, что при таком положении объекта и сети наблюдений метод электротомографии не способен решить задачу не только картирования, но и даже обнаружения неоднородности-провала.



Точность определения верхней кромки на геоэлектрических разрезах при ее положении на 6 м и 13 м весьма неплохая: кромка располагается на 6.5 м и 11 м соответственно, и ошибка в обоих случаях находится в пределах 15%. Она существенно увеличивается пропорционально

увеличению глубины кромки, заданной в модели: для положения 37 м в модели на разрезе кромка фиксируется уже на отметках глубин около 30 м (20%), а для положения 60 м на разрезе объект вовсе не обнаруживается, как было отмечено выше, поэтому речи о точности определения положения его верхней границы уже идти не может.

Но наиболее интересными оказываются результаты инверсии при определении положения нижней границы объекта (Рис. 2.3).



На разрезе, полученном по модели с верхней кромкой на 6 м и нижней на 13 м, срез модели имеет форму, отвечающую сечению начально заданной модели – прямоугольник. Для этой

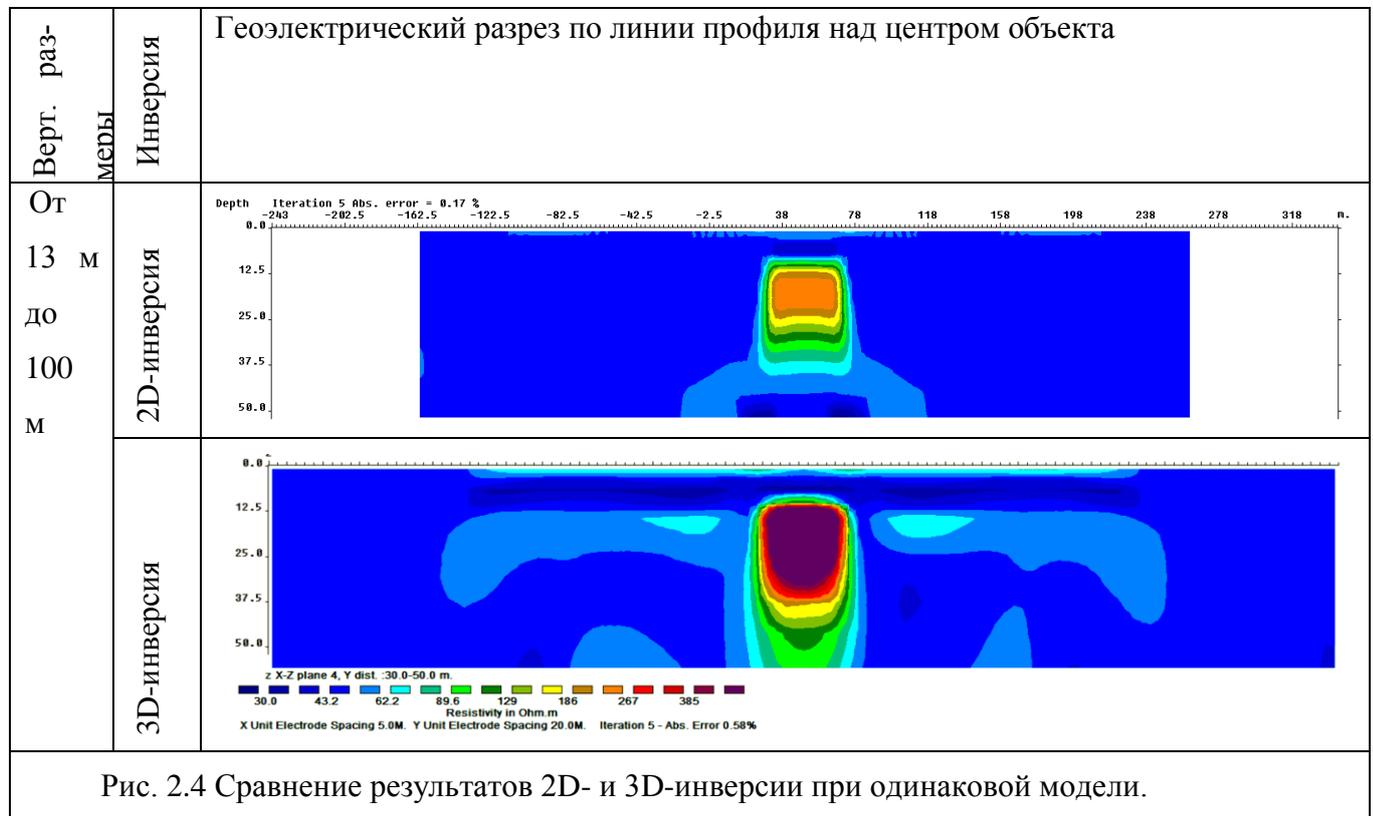
модели после инверсии происходит частичное и сравнительно незначительное занижение глубины нижней кромки: она находится на 17 м (около 30%). Для остальных модельных отметок, наоборот, наблюдается явное завышение глубины нижней кромки на геоэлектрических разрезах, причем для двух последних положений (60 м и 100 м) кромки в модели, форма аномалии на разрезе вообще совпадает. Кроме того, вместо прямоугольной формы аномалия приобретает форму «коренного зуба», так как в центре снизу ее компенсирует сопряженный минимум.

Объяснение этому эффекту может быть следующее. Моделирование проводилось для трехмерной модели, а инверсия проводилась двумерная. Это дает основание предположить, что этот эффект «плавания» глубины нижней кромки связан с трехмерным строением объекта: сказывается влияние боковых стенок объекта, расположенных параллельно профилю. При моделировании ток «обтекает» высокоомный объект по бокам, и ниже максимума на инверсии появляется сопутствующий ему минимум. Вследствие этого значительно искажается положение нижней границы тела после двумерной инверсии. Это приводит к ошибочной интерпретации. Особенно принципиально этот эффект меняет интерпретацию для модельного положения кромки на 60 и 100 м («коренной зуб»). Эта глубина при заданных в моделировании параметрах съемки является приближенной симуляцией объекта, бесконечно протяженного на глубину, - положение его нижней кромки ниже, чем максимально возможная глубинность исследований. И поэтому в результатах съемки нижняя граница вообще не должна наблюдаться. Однако на обоих разрезах она фиксируется на глубинах не ниже 25-30 м (ошибка даже в лучшем случае 50%). То есть объект с большой глубиной нижней кромки может быть принят за объект, резко ограниченный по глубине. Это имеет большое значение с точки зрения интерпретации при определении размеров карстово-суффозионной полости и оценке потенциальной опасности возникновения провала.

Предположительно положение восстановленной по результатам двумерной инверсии границы тесно связано не только с глубиной нижней кромки, но и с контрастностью и относительными горизонтальными размерами объекта вкrest линии профиля, хотя подробно характер этой зависимости мной не изучался.

Косвенным подтверждением трехмерной природы обнаруженного эффекта являются результаты трехмерной инверсии по 7 параллельным профилям 2D-электротомографии над тем же объектом (Рис. 2.4), на основании которых оценка размеров и контрастности объекта получается точнее. При глубинах 13 м и 100 м верхней и нижней кромок в модели на геоэлектрическом разрезе (сечении объемной геоэлектрической модели) глубина верхней кромки расположена на 11.5 м (ошибка около 10 %). Глубину нижней границы аномалии точно определить не удастся, но намечается явная тенденция к ее «углублению» относительно результатов двумерной инверсии. Кроме того, в трехмерной модели не возникает сопряженной отрицательной

аномалии непосредственно под объектом, которая, вероятно, также частично «завышает» положение нижней границы аномалии в результатах двумерной инверсии. Поэтому точность оценки глубины нижней границы объекта (и, следовательно, его объема) по трехмерной томографии оказывается выше. Точное же определение положения нижней границы здесь затруднено снижением разрешающей способности измерений с глубиной, поскольку глубина границы в модели близка к максимальной глубинности исследований.



Выводы

Опыт работы с подобными трехмерными объектами в электротомографии пока невелик. Поэтому выявленный эффект ограничения глубины трехмерного объекта при двумерных измерениях является чрезвычайно важным. Он означает, что невозможно даже оценочное определение глубины залегания нижней границы и объема незаполненной карстово-суффозионной полости на основе двумерной интерпретации данных электротомографии по профилю. В такой ситуации эта информация может оказаться недостоверной, и более надежными будут оценки на основе трехмерных исследований. Однако проведение трехмерной съемки или даже съемки по регулярной сети нескольких параллельных профилей (в том числе при поисках подобных карстовых полостей) на застроенных территориях – это очень трудоемкий процесс, а зачастую практически и/или экономически неосуществимый. В то время как измерения по профилю 2D-электротомографии реализовать физически намного проще. С учетом выявленного эффекта ограничения глубины трехмерного объекта этот факт приводит к заключению, что для коррект-

ной интерпретации необходимо искать пути подавления искажений геоэлектрического разреза по двумерным измерениям. Корректировать результаты двумерной инверсии можно путем подбора оптимальных параметров, но для этого необходимо привлечение какой-либо априорной информации о строении изучаемой полости (ее относительной контрастности, горизонтальных размерах и т.п.).

3. Влияние трехмерных продольных неоднородностей на данные двумерной профильной электротомографии

Режимные наблюдения методом электротомографии на гребне каменно-набросной плотины

Одним из эффективных способов подавления трехмерных искажений в двумерных данных является расчет разностных моделей для нескольких циклов режимных наблюдений.

Режимные наблюдения (или мониторинг) с использованием геоэлектрических методов являются одним из наиболее актуальных направлений в настоящее время в развитии малоуглубинной электроразведки. Совершенствование систем наблюдения и аппаратуры в этом направлении привело к тому, что результаты геоэлектрических режимных наблюдений показывают во всем мире очень высокую эффективность, в особенности, при обследовании тела плотин различного типа. Они позволяют выявлять неоднородности сопротивления в теле плотины, которые могут быть связаны с возникновением ослабленных зон, зон повышенной фильтрации воды и т.п. Локализация и наблюдение за этими областями во времени помогает своевременно предупреждать развитие опасных процессов.

В случае с линейными плотинами 3D-неоднородность среды определяется двумя факторами (Рис. 2.5).

Во-первых, трехмерным характером обладают целевые фильтрационные зоны, расположенные на глубине непосредственно под линией профиля, – это локальные аномальные области пониженного сопротивления. Однако двумерное приближение среды, используемое в обработке и интерпретации данных двумерной электротомографии, вполне оправдано при выявлении таких областей. Искажения геоэлектрического разреза, которые могут быть вызваны трехмерным характером таких неоднородностей, не будут являться помехой при локализации горизонтального положения аномалий, оценке глубины верхней границы. А при предполагаемой контрастности и геометрии фильтрационных зон, эти искажения, вероятно, не будут превышать точность измерений. Во-вторых, строение плотины характеризуется наличием большого количества линейных сторонних неоднородностей, расположенных на разной глубине и разном расстоянии от профиля наблюдений на ее гребне. В них входит продольный рельеф плотины и ли-

нейные двумерные конструктивные особенности сооружения плотины с известной планировкой и геометрией, вытянутые вдоль оси профиля. По предварительным оценкам, именно эти объекты могут оказывать существенное влияние на данные измерений. И именно от таких искажений позволит избавиться расчет разностных разрезов.

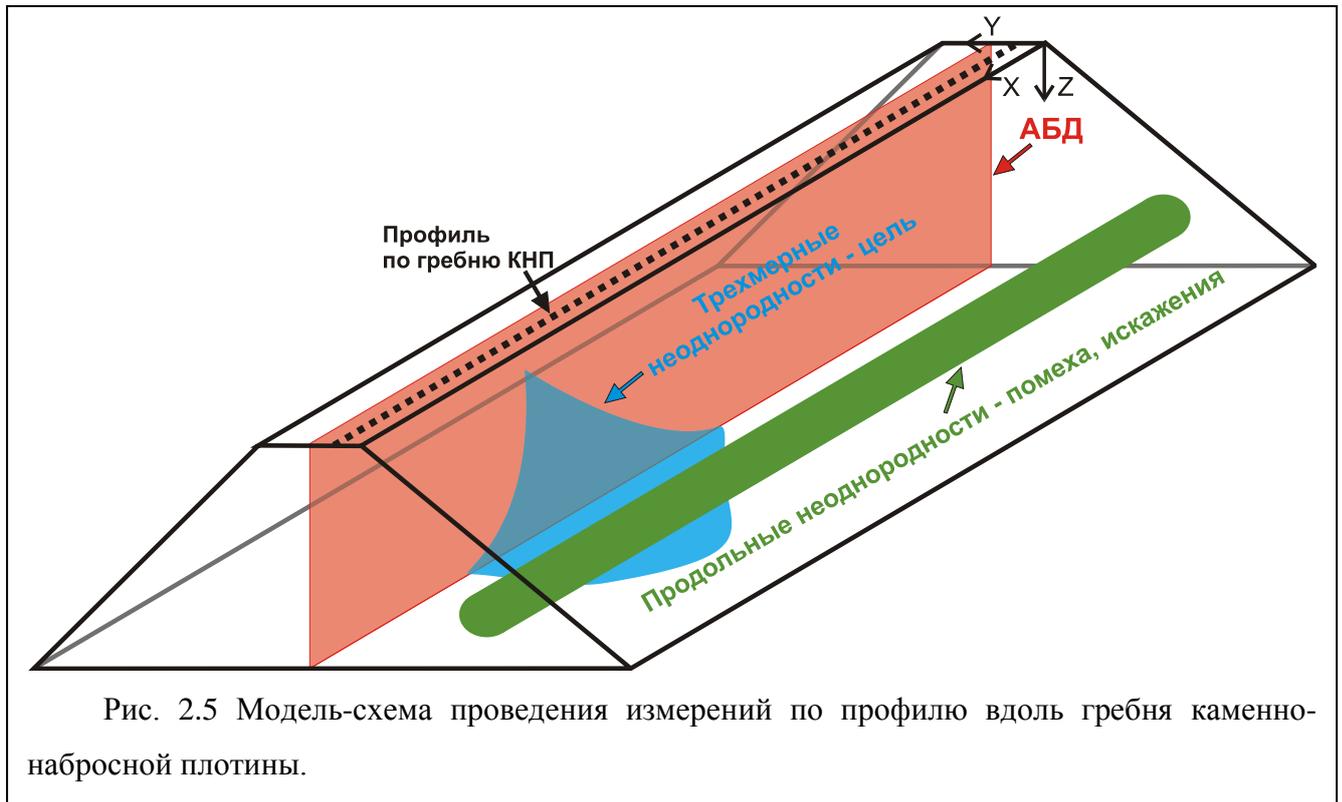


Рис. 2.5 Модель-схема проведения измерений по профилю вдоль гребня каменно-набросной плотины.

Далее показаны результаты режимных наблюдений и разностные разрезы при мониторинге состояния каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС (Смульский П.Я., 1992).

Описание объекта исследований

Богучанская ГЭС расположена на р. Ангара в районе г. Козьмодемьянск Кежемского района Красноярского края. В состав основных сооружений гидроузла входят: левобережная бетонная плотина, совмещенное здание ГЭС и каменно-набросная плотина (КНП) (Рис. 2.6). Уникальность сооружения заключается в том, что основным противодиффузионным элементом КНП является асфальтобетонная диафрагма (АБД), которая представляет собой вертикальную «мембрану» в осевой части плотины (Рис. 2.7). Толщина АБД составляет от 1,6 м в основании диафрагмы до 0,8 м у ее кровли. По обеим сторонам диафрагмы в верхнем и в нижнем бьефах (ВБ и НБ) отсыпаны переходные дренирующие слои из песчано-гравийной смеси, а уже затем слои каменной наброски.

Вдоль подошвы АБД проходит бетонная дренажно-цементационная галерея, из которой выполнена цементация основания плотины. В эту же галерею выведены устья восходящих дренажных скважин, водоприемники которых установлены в низовом переходном слое КНП. Скальное основание и правобережное примыкание КНП усилено противодиффузионной це-

ментационной завесой. В основании КНП залегают долериты ангарской свиты триаса (βT_1) и переслаивающиеся песчаники, аргиллиты и алевролиты усть-кутской свиты ордовика (O_{1uk_1}) (Смульский П.Я., 1992).

Данная КНП является одной из самых высоких в мире плотин аналогичной конструкции, её высота составляет более 80 м. С учетом работ по наращиванию АБД и переходных слоев КНП, проведенных вследствие естественной осадки сооружения, к 2013 году гребень АБД достиг абсолютной отметки 208 м, а к 2014 – 212 м. Исходный уровень воды (УВ) до наполнения водохранилища составлял 138 м. Его напол-

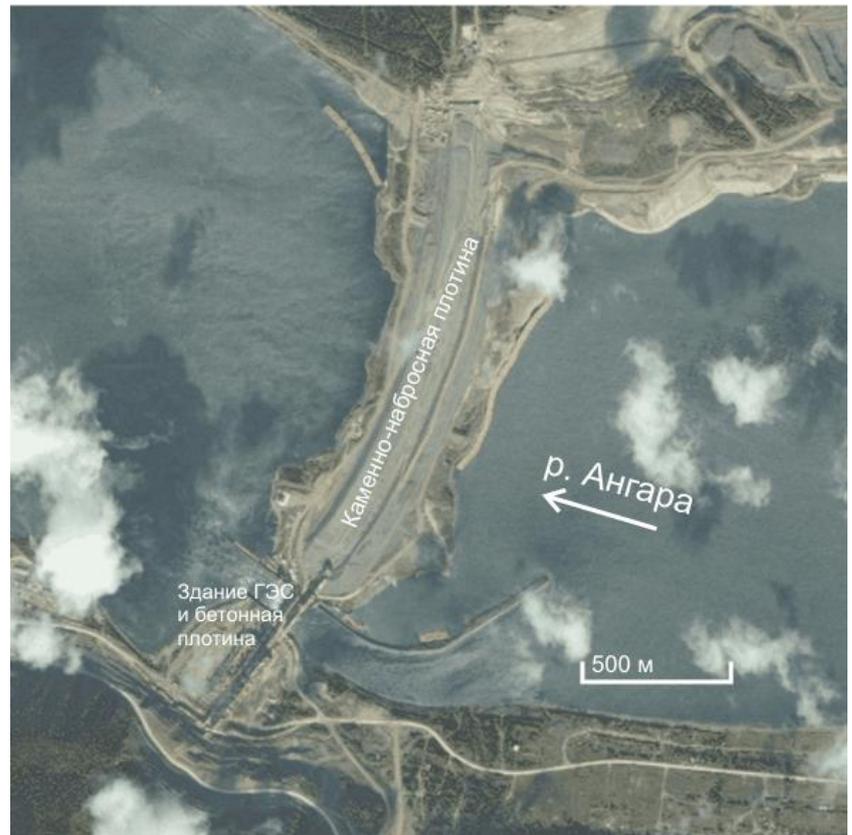


Рис. 2.6 План сооружений Богучанской ГЭС.

нение было начато в марте 2012 года. К маю уровень верхнего бьефа водохранилища был быстро поднят с отметки 138 м до отметки 168 м, а затем в течение летних месяцев уровень выдерживался около 168 м. В осенне-зимний период 2012 года наполнение продолжилось, в декабре УВ достиг 188 м.

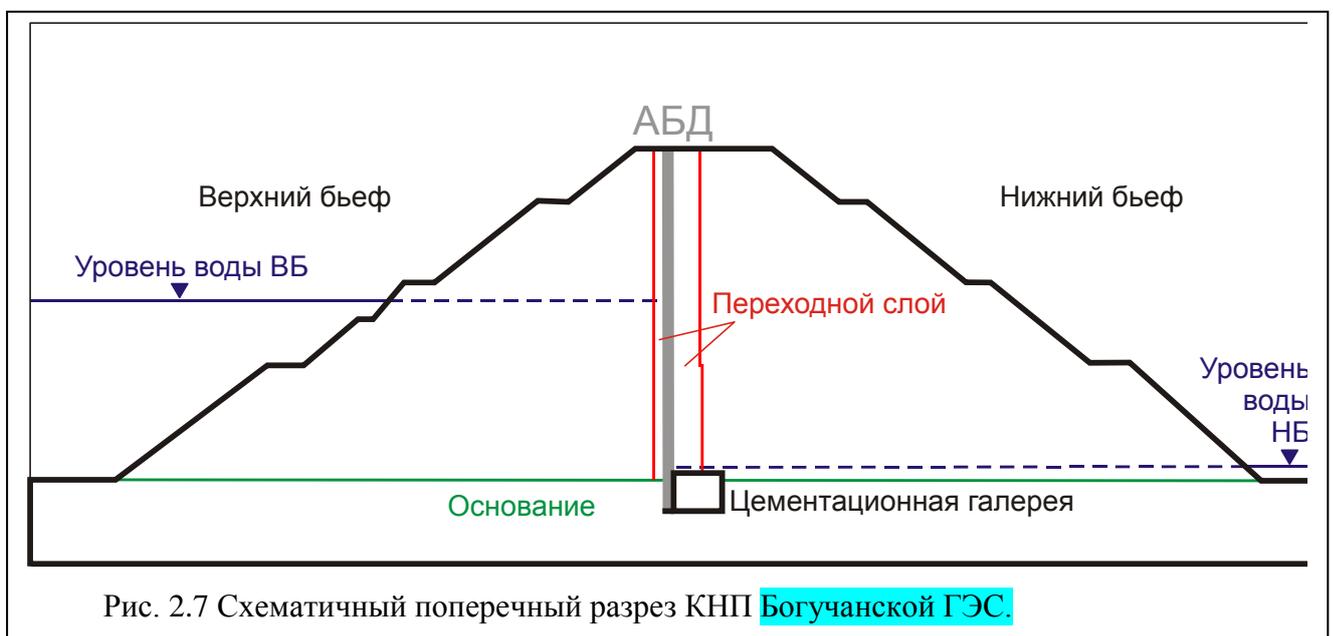


Рис. 2.7 Схематичный поперечный разрез КНП Богучанской ГЭС.

Постановка задачи и цели исследования

В ходе перерыва в строительстве в период 1992-2002 были допущены некоторые отклонения от графика возведения асфальтобетонной диафрагмы, а также нарушения технологии консервации плотины в зимний период (Информационное Заключение..., 2012). Указанные нарушения могли привести к появлению трещиноватых интервалов. Неоднородности и нарушения в толще АБД отмечались визуально в виде расхождения некоторых швов и неравномерной осадки уложенных блоков и устранялись по мере выявления. Однако некоторые трещиноватые зоны могли быть пропущены, и на данной стадии они могут стать причиной развития фильтрационных процессов в теле плотины. Поэтому в период первого наполнения водохранилища в 2012-2013 годах была поставлена задача выявления фильтрационных процессов, связанных с нарушением целостности АБД. Также необходимо было проследить развитие этих процессов во времени с целью оценки их интенсивности и скорости фильтрации.

Надо отметить, что визуально существенных фильтрационных или деформационных проявлений в период первого наполнения отмечено не было. Однако на некоторых участках в период выполнения наблюдений из дренажных скважин галереи наблюдался капёж и даже непрерывное истечение воды разной интенсивности. Кроме того, отмечались большие деформации гребня КНП на участке, примыкающем к сопряжению с бетонной плотиной.

Геоэлектрические режимные наблюдения

Необходимость прослеживания развития любого, в том числе и фильтрационного процесса во времени приводит к разработке системы режимных геофизических наблюдений (или геофизического мониторинга).

Под термином «система режимных геофизических наблюдений» понимается система измерений, периодически проводимых с помощью фиксированной сети максимально стабилизированных датчиков. Периодичность измерений в данном случае определяется особенностями графика подъема воды и сезонными колебаниями влажности и температуры.

Опыт геофизического мониторинга на крупных гидротехнических объектах указывает на необходимость заблаговременного формирования специализированного комплекса наблюдений во время первого наполнения водохранилища. Схемы наблюдений для этого, наиболее ответственного, периода требуют существенно большей детальности (как временной, так и пространственной), чем системы наблюдений эксплуатационного периода, поскольку в этот начальный период выбираются и отрабатываются оптимальные методики и режимы наблюдений.

Основой системы при исследованиях КНП Богучанской ГЭС был выбран геоэлектрический контроль. Опробованный первоначально в варианте ВЭЗ, он продемонстрировал приемлемую детальность и глубину исследования вплоть до скального основания плотины. Кроме

того, предполагалась высокая чувствительность геоэлектрических методов при выявлении фильтрационных зон повышенной обводненности, так как при развитии фильтрационных процессов в теле каменно-набросной плотины возникает аномальное естественное электрическое поле, а также изменяются параметры грунта, уложенного в её тело, в частности, снижается величина удельного электрического сопротивления (УЭС).

Главным методом геоэлектрического контроля была выбрана электротомография (ЭТ), поскольку она, как двумерный аналог ВЭЗ, позволяет выявлять изменения УЭС в разрезе при условии, что ожидаемые аномалии на продольном профиле (вдоль оси плотины) имеют двумерный характер. Остальные методы, входящие в комплекс режимных исследований по геоэлектрическому контролю, носили вспомогательный характер: наблюдения за изменением естественного электрического потенциала методом естественного поля (ЕП), наблюдения за температурой и минерализацией фильтрующейся воды.

Сложный и сильно расчлененный рельеф на участке работ существенно ограничивал размеры и ориентации установок, поэтому сеть наблюдений включала только измерения методом ЭТ вдоль оси сооружения по профилю на гребне. Таким образом, с учетом поперечного строения плотины (Рис. 2.7) исследования методом двумерной электротомографии на данном объекте проводились над заведомо трехмерной средой, вследствие чего возможны искажения в измеренном поле, связанные с влиянием трехмерных неоднородностей на данные двумерных измерений.

Фиксированная система наблюдений

После проведения I цикла измерений на гребне, стало очевидно, что для соблюдения одинаковых условий заземления и геометрии системы наблюдения при режимных наблюдениях необходимо проводить измерения по стационарной сети электродов. На этапе планирования необходимо было разработать специализированную схему наблюдений, включающую выбор параметров съемки и подготовку сети фиксированных электродов. Поэтому для выполнения режимных измерений на гребне КНП было смонтировано 192 электрода с шагом между электродами 10 м. Всего. Монтаж фиксированных электродов вдоль всего гребня был осуществлен в мае-июне 2012 года.

Фиксированный электрод на гребне КНП представляет собой свинцовый брусок массой около 2 кг с подсоединенным герметизированным отводом (Рис. 2.8). Для обеспечения стабильного электрического контакта электрод располагается в толще суглинка, заполняющего углубление низового переходного слоя.

Перед проведением каждого следующего цикла измерений выполнялся визуальный осмотр состояния отводов фиксированных электродов, а также измерения переходных сопротивлений для оценки электрического контакта и сохранности изоляции.

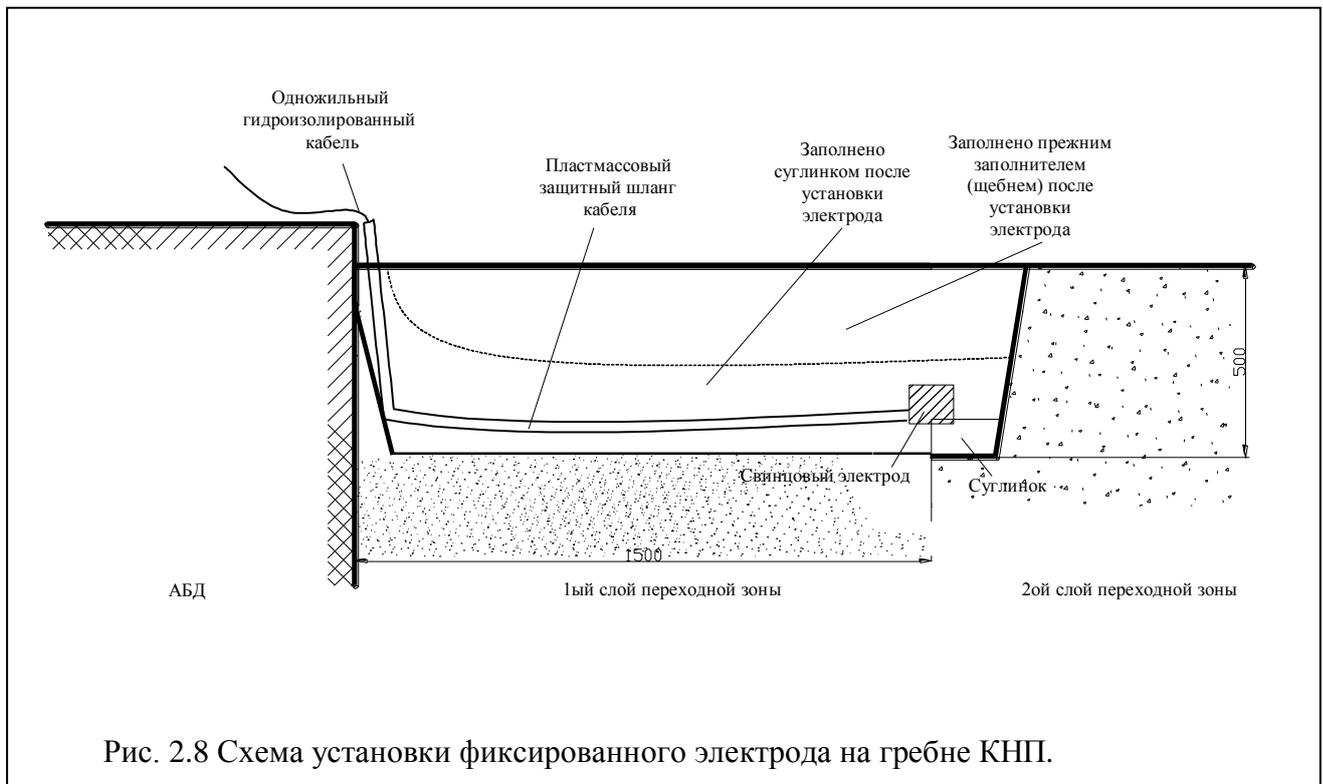


Рис. 2.8 Схема установки фиксированного электрода на гребне КНП.

Циклы наблюдений и параметры съемки при полевых исследованиях

Основой выделения во времени отдельного цикла наблюдений было однократное проведение измерений методом ЭТ на гребне плотины по фиксированной сети электродов. Методы, имеющие подчиненное значение (ЕП, резистивиметрия, термометрия), выполнялись в рамках каждого цикла по возможности и не всегда систематически.

В процессе мониторинга КНП на стадии первого заполнения водохранилища с октября 2011 года по сентябрь 2013 года на профиле по гребню КНП было проведено пять циклов измерений методом электротомографии:

1. Цикл I выполнялся в октябре 2011 года (до подъема воды в водохранилище при уровне воды 138 м). Цикл был опорным и носил частично разведочный и методологический характер. На основе его результатов были определены возможности метода для выявления неоднородностей КНП и мониторинга ее состояния, а также заложено и утверждено положение фиксированной сети электродов и шаг между ними.

2. Цикл II выполнен в июле 2012 года (УВ 168 м). К началу этого цикла были полностью установлены все фиксированные электроды на гребне. Поэтому измерения были проведены методом ЭТ на профиле вдоль всего гребня по сети фиксированных свинцовых электродов с шагом 10 м. Параметры съемки и система наблюдений соответствовали использованному в опорном Цикле I.

3. Цикл III был проведен в сентябре 2012 года (УВ 168 м). Параметры съемки и система наблюдений идентичны Циклу II.

4. Цикл IV был проведен в сентябре 2013 года (УВ 188 м). Параметры съемки и система наблюдений идентичны Циклам II и III с учетом замены вышедших из эксплуатационного состояния фиксированных электродов.

Измерения проводились с трехэлектродной комбинированной установкой Шлюмберже **Amn + mnB**, шаг между электродами – 10 м, минимальный и максимальный разности АО были 15 м и 235 м соответственно. Электрод «бесконечность» был расположен в воде р. Ангара со стороны верхнего бьефа в 2-3 км от профиля.

Общая длина профиля составляла максимально 1910 м (с ПК11+70 по ПК30+80 в пикетаже плотины). Вариация длины и привязки профиля была обусловлена измерением условий проведения измерений и частично вышедшей из эксплуатационного состояния сетью электродов по краям.

Расчет кажущегося сопротивления на гребне КНП от двумерной модели плотины при помощи математического моделирования методом МИУ

После выполнения измерений требовалось оценить абсолютные значения сопротивления и их изменения в ходе наполнения водохранилища, а также степень влияния на данные трехмерных продольных неоднородностей (формы откосов, цементационной галереи, АБД и т.п.). Такую оценку я проводила путем сравнения результатов измерений с результатами численного моделирования для соответствующих моделей.

Стартовая модель была построена на основе анализа полученных на начальном этапе геоэлектрических разрезов (далее на Рис. 2.13). В выделенных структурных элементарных блоках модели были заданы сопротивления, согласующиеся с полученными после инверсии данных полевых измерений.

На основе стартовой модели был также создан класс моделей КНП (5 моделей), отражающий ее принципиальное геоэлектрическое строение в разном состоянии и на разных этапах подъема уровня воды в верхнем бьефе.

Для моделирования была использована программа IE2DP2 (Электрическое зондирование..., 1988). Алгоритм данной программы позволяет проводить моделирование для линейных электроразведочных установок, ось которых перпендикулярна к оси двумерной модели.

Критерием оценки сопротивлений и их изменений служила степень корреляции между средней кривой ВЭЗ, рассчитанной для геоэлектрического разреза по данным ЭТ в каждом цикле измерений, и кривой ВЭЗ, полученной при моделировании.

Цели моделирования заключались в оценке:

- 1) воздействия воды на геоэлектрические свойства КНП при заполнении водохранилища;
- 2) влияния фильтрационных процессов на геоэлектрические свойства КНП;

- 3) возможности выявления фильтрации воды (протечек) в нижний бьеф через диафрагму по данным ЭТ;
- 4) свойств и структурных особенностей тела плотины.

Основная рабочая модель в использованной программе IE2DP2 – полупространство. Верхнее полупространство – воздух, который имеет сопротивление $\rho=\infty$ (численно в программе $\rho=99999$ Ом·м). Исходя из этого учет рельефа производился с помощью блоков, имитирующих воздух и также имеющих $\rho=99999$ Ом·м (Рис. 2.9).

Для моделирования была выбрана аппроксимация плотины блоковой моделью, отражающей основные особенности ее строения и включающей: два блока для имитации воздуха (светло-серый); блок АБД (красный), блок основание (зеленый.), галерея (темно-серый), два блока необводненной отсыпки (коричневый), два блока необводненного переходного слоя (желтый), блок обводненного тела КНП, включающий переходный слой и отсыпку ниже уровня воды (голубой), блок воды в водохранилище (синий). Их структурная конфигурация, форма и размеры совпадали с реальными габаритами (1 м реальной плотины равен 1 условной единице размерности программы), за исключением формы блоков для имитации рельефа: их точная геометрия при задании модели потребовала бы существенного увеличения числа ячеек и времени расчёта, поэтому граница была аппроксимирована наклонной прямой.

Расчет был проведен для пяти различных моделей плотины (Рис. 2.9):

- 1) Модель 1 – без заполнения верхнего бьефа (уровень воды в верхнем и нижнем бьефах минимальный 138 м, тело плотины и основание не обводнены);
- 2) Модель 2 – после заполнения верхнего бьефа до уровня 168 м (уровень воды верхнего бьефа (УВБ) 168 м, уровень нижнего воды бьефа УНБ – 138 м, обводнено тело плотины со стороны ВБ, основание обводнено частично);
- 3) Модель 3 – после заполнения верхнего бьефа до уровня 168 м (УВБ 168 м, УНБ 138 м, обводнены тело плотины со стороны ВБ, обводнено основание);
- 4) Модель 4-1 – после заполнения верхнего бьефа до уровня 188 м (УВБ 188 м, УНБ 138 м, обводнено тело плотины со стороны ВБ, обводнено основание);
- 5) Модель 4-2 – после заполнения верхнего бьефа до уровня 188 м и с фильтрацией через АБД (УВБ 188 м, УНБ 168 м, обводнено тело плотины по обе стороны от диафрагмы, обводнено основание).

Надо отметить, что форма депрессионной кривой в реальности будет отличаться от заданной в Модели 4-2, ее уровень намеренно завышен при моделировании, чтобы оценить максимальный вклад обводнённости низовой грани при нарушении целостности АБД.

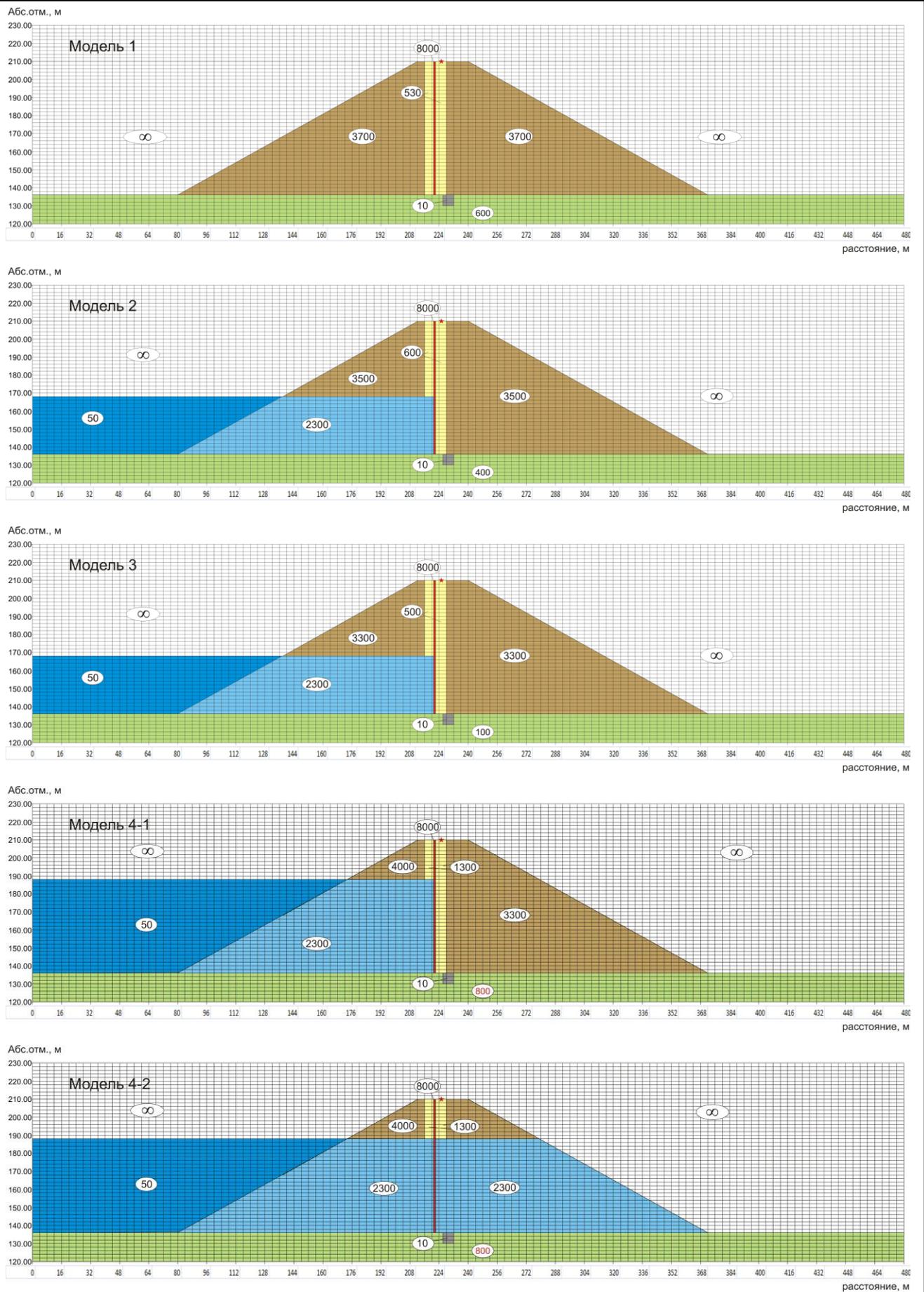


Рис. 2.9 Модели плотины для моделирования.

Электрическое поле рассчитывалось для трехэлектродной установки Шлюмберже, которая располагалась вдоль гребня плотины. Минимальный и максимальный разности $AO=AB/2$ составляли 15 и 300 м. Положение профиля наблюдений отмечено на Рис. 2.9 звездочкой.

Результаты моделирования

Для сравнения с модельными данными в качестве опорной полевой кривой была выбрана осредненная по гребню кривая ВЭЗ, полученная по результатам выполнения электро-разведочных измерений методом электротомографии для каждого цикла отдельно (Рис. 2.10). При расчете каждой кривой использовались данные лишь по тем частям профиля, в которых отсутствуют видимые искажения от двумерных объектов (исключены интервалы данных с искажениями от смотровых шахт и правобережного примыкания).

Параметры каждой модели подбирались так,

чтобы кажущееся сопротивление максимально совпадало с полученными значениями кажущихся сопротивлений в соответствующем цикле измерений (цикл I, октябрь 2011 года – модель 1; цикл II, май и июль 2012 года – модель 2; цикл III, сентябрь 2012 года – модель 3; цикл IV, сентябрь 2013 года – модель 4-1). Модель 4-2 демонстрирует фильтрационный процесс, развивающийся на фоне модели 4-1.

По результатам подбора моделей при моделировании и при анализе полученных полевых и модельных кривых (Рис. 2.12, Рис. 2.11) можно сделать следующие выводы:

1. Для всей совокупности моделей сопротивление блоков составляет:

— 8000 Ом·м для АБД,

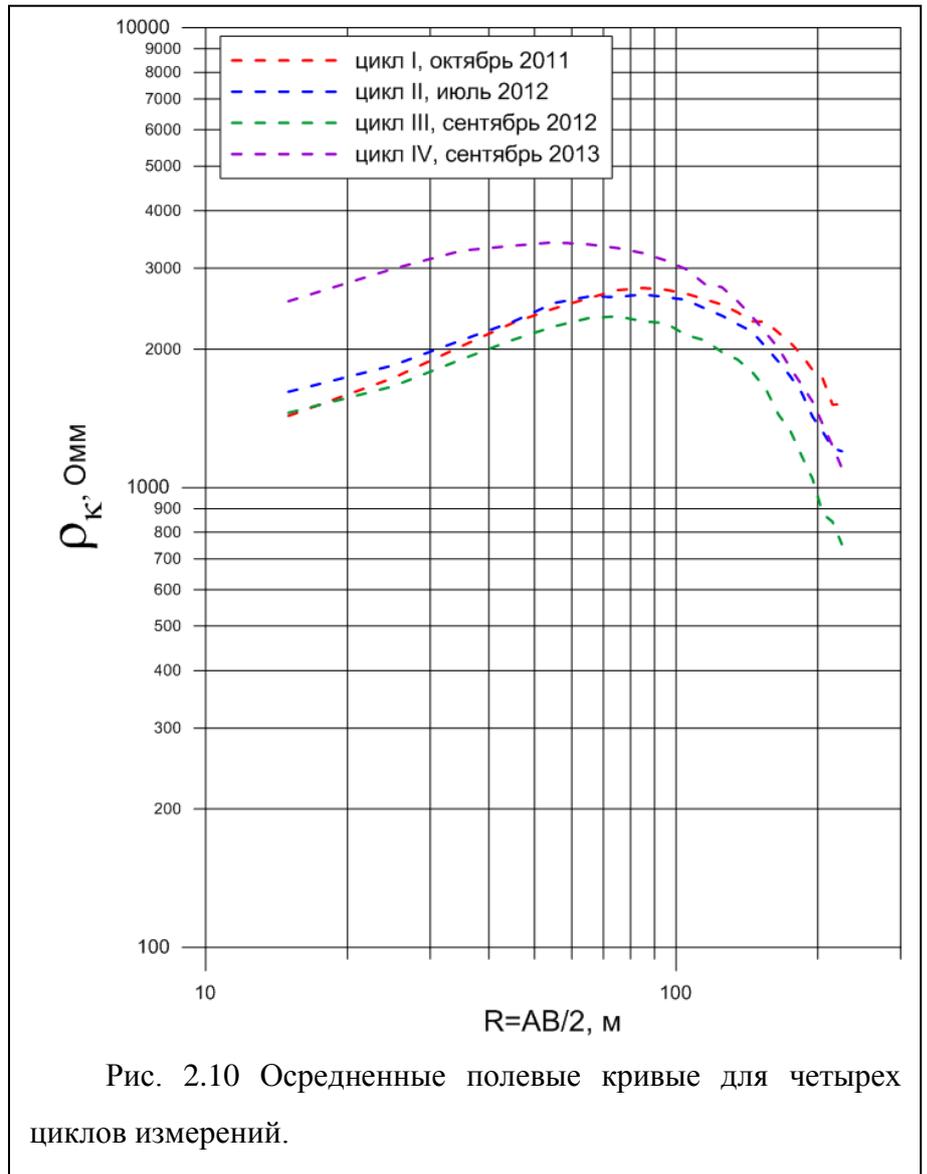


Рис. 2.10 Осредненные полевые кривые для четырех циклов измерений.

- 10 Ом·м для цементационной галереи,
- 50 Ом·м для воды,
- 100-600 Ом·м для основания (постепенно снижается с 600 до 100 при обводнении),
- 3300-4000 Ом·м для отсыпки КНП (обусловлено колебаниями влажности),
- 500-600 Ом·м для переходного дренажного слоя,
- 2300 Ом·м для обводненного переходного дренажного слоя и обводненной КНП.

2. На графиках (Рис. 2.12, Рис. 2.11) в левой части на минимальных разносах каждая кривая стремится к среднему сопротивлению между сопротивлениями переходного слоя и отсыпки КНП. Также в этом интервале разносов на величину ρ_k влияет близость высокоомной АБД.

3. Повышение сопротивления на разносах от 30 до 70–80 м определяется влиянием совокупности трех факторов – высокого сопротивления сухой отсыпки, АБД и рельефа.

4. На разносах более 80–100 м ρ_k падает. Характер его понижения зависит от сопротивления основания разреза, сопротивления обводненного тела плотины и контраста между сопротивлениями основания и отсыпки КНП.

5. В процессе наполнения водохранилища сопротивление основания постепенно понижается, что, вероятно, связано с увеличением его обводненности. Оно, по всей видимости, составляло 600 Ом·м в октябре 2011 года (модель 1), 400 Ом·м в июле 2012 года (модель 2), 100 Ом·м в сентябре 2012 года (модель 3). Сопротивление основания в

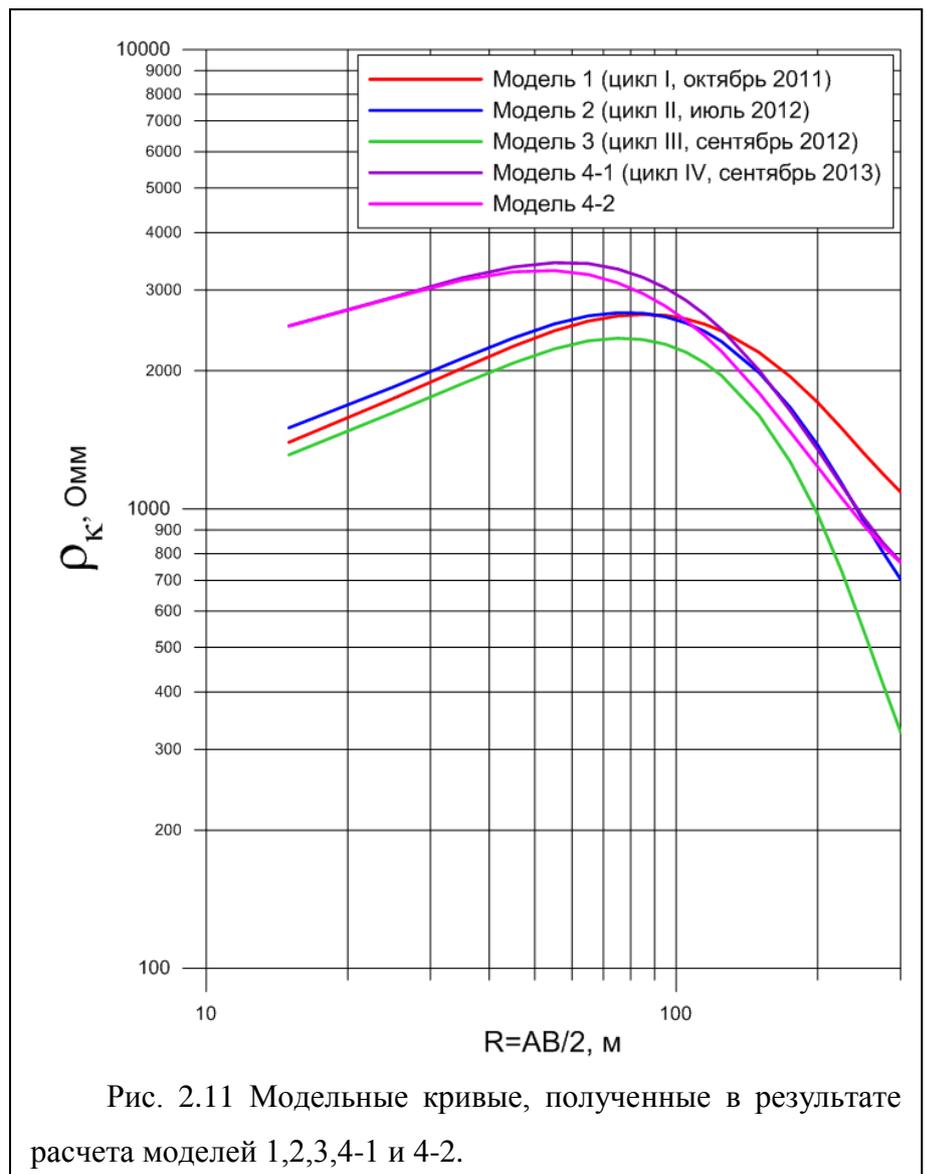


Рис. 2.11 Модельные кривые, полученные в результате расчета моделей 1,2,3,4-1 и 4-2.

моделях 4-1 и 4-2 является исключением, по данным моделирования оно достигает 800 Ом·м. Это противоречит, во-первых, общей тенденции снижения сопротивления в результате водона-

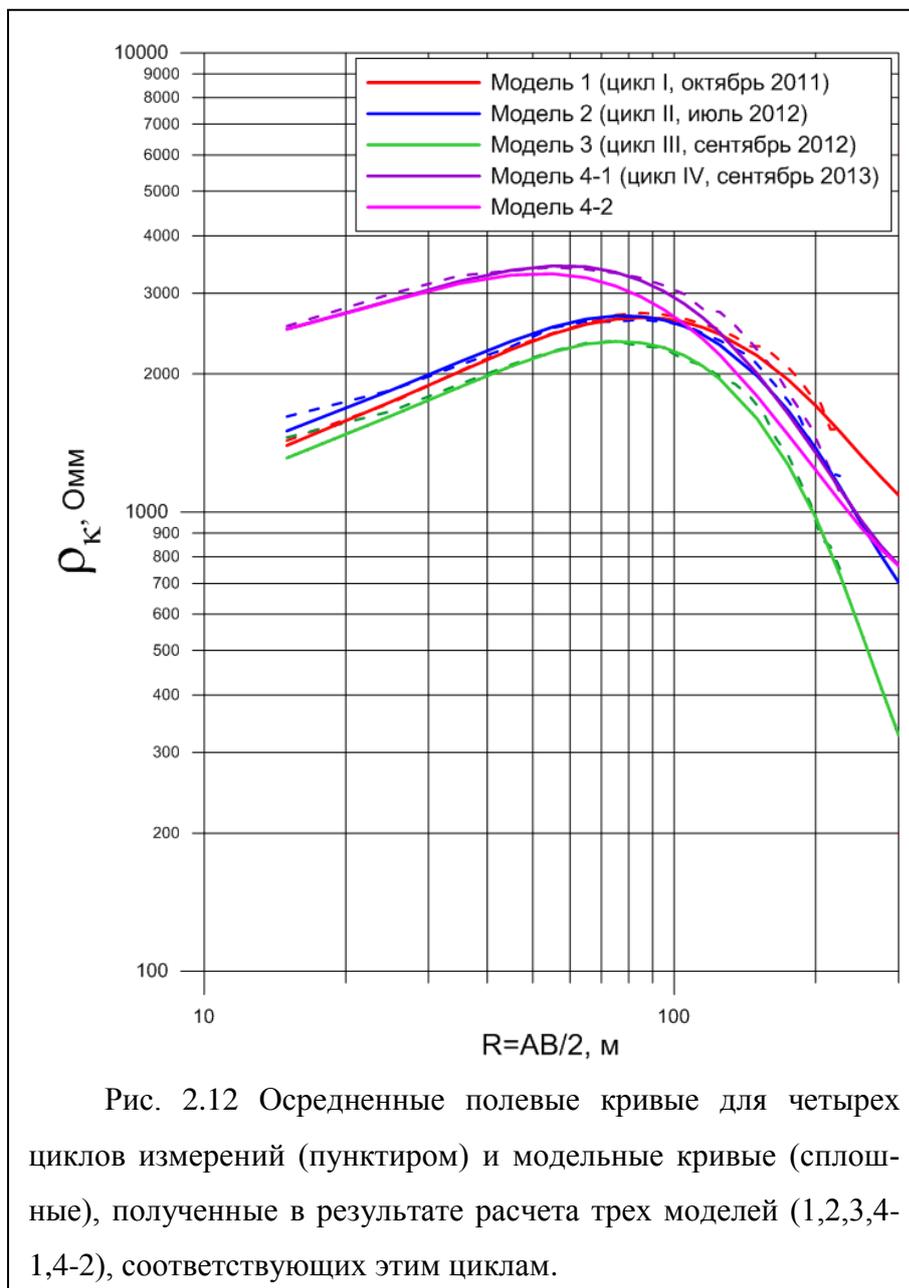
сущения, а во-вторых, результатам инверсии (Рис. 2.13). Есть предположение, что это может быть вызвано искажением модели (неудачным подбором эквивалентных параметров) из-за существенного отличия полевой осредненной кривой цикла IV в сентябре 2013 года от аналогичных кривых остальных циклов (Рис. 2.10).

6. Наличие проводящей галереи в нижней части модели и изменение ее сопротивления не влияют на результаты моделирования.

7. Различие между кривыми для моделей без заполнения и с заполнением водохранилища (между кривыми для модели 1 и для моделей 2, 3, 4) отражает принципиальную возможность выделять разные уровни заполнения ВБ с помощью метода сопротивлений: при повышении уровня воды в ВБ на кривой, начиная с некоторого разноса, наблюдается понижение значений ρ_k (чем выше уровень воды в ВБ, тем с меньшего разноса наблюдается понижение).

8. На кривой для модели с фильтрацией воды в НБ (модель 4-2) по сравнению с графиком для модели без фильтрации (модель 4-1) наблюдается понижение сопротивления от 5 до 15% на разносах от 80 м до 200 (все остальные параметры совпадают).

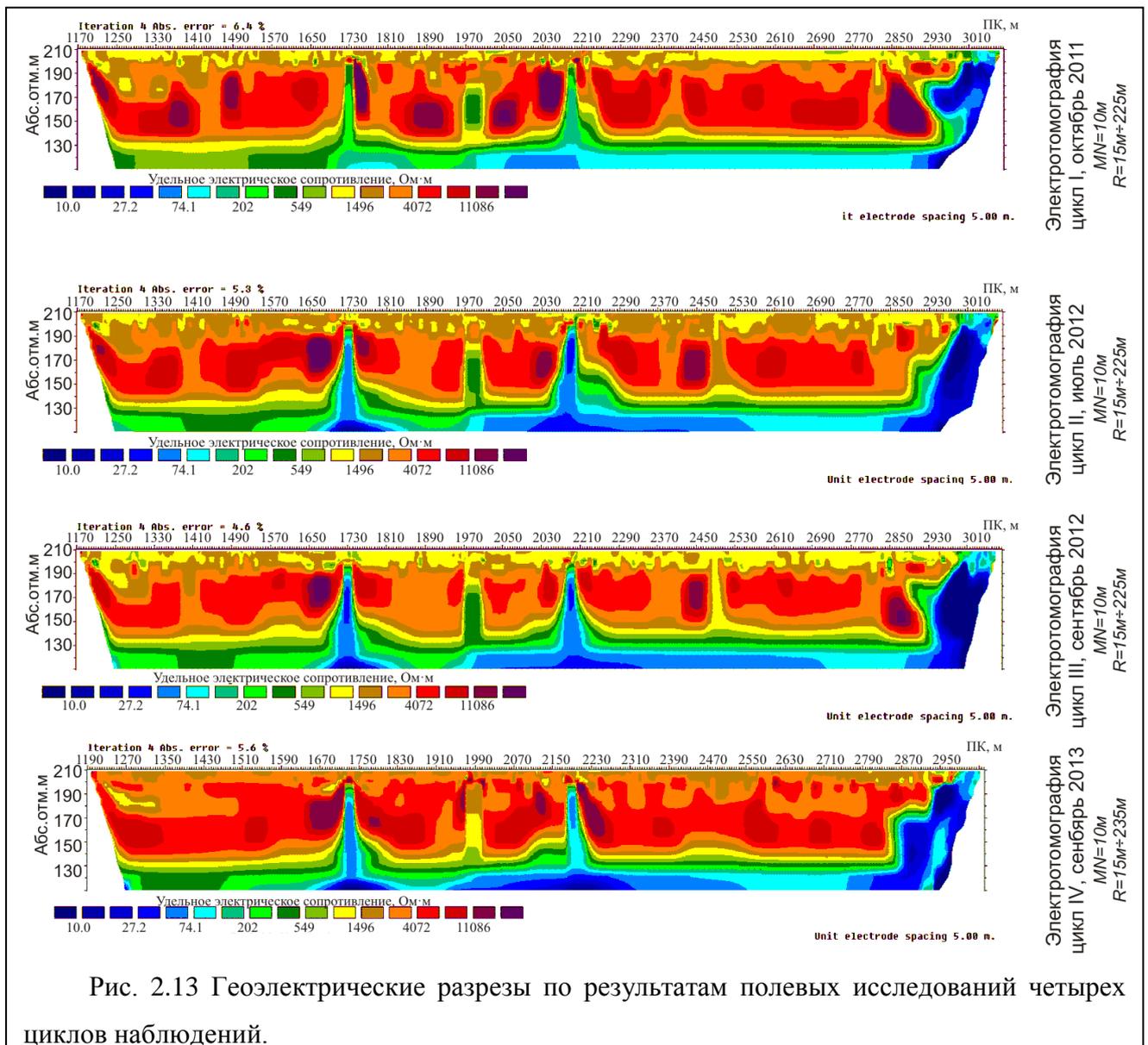
Проведенное моделирование позволило уточнить реальные величины УЭС элементов изучаемой конструкции и её основания и оценить величину аномальных эффектов, возникающих в случае развития фильтрационных процессов. Стоит отметить, что эффект, возникающий при обводнении низовой грани толщи КНП в результате развития локального фильтрационного



процесса (модель 4-2), весьма невелик на фоне помех из-за влияния продольных конструктивных неоднородностей плотины, обводнения скального основания и увеличения уровня ВВ (модели 1–4-1). И при проведении измерений традиционным методом ВЭЗ и «одномерной» обработке идентифицировать указанный эффект по амплитуде аномалии практически невозможно. Однако аномалия, возникающая при локальном обводнении низовой грани, будет иметь двумерный характер на продольном профиле вдоль оси плотины, в отличие от всех вышеперечисленных эффектов-помех, являющихся постоянными на таком профиле. Поэтому применение ЭТ при мониторинге дает возможность выделять аномальные зоны по их форме даже при небольших амплитудах изменений (снижении сопротивления менее чем на 10%).

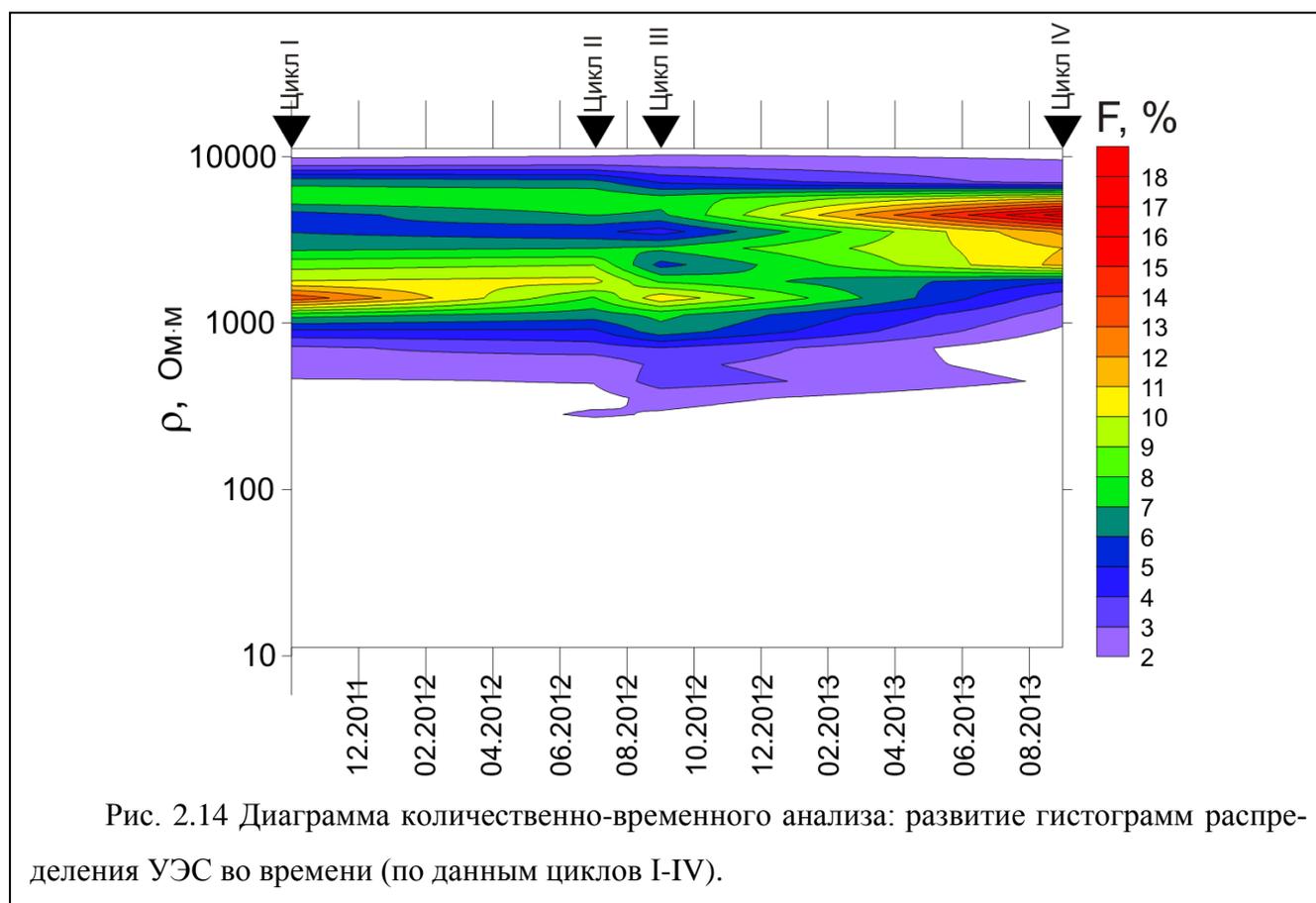
Результаты режимных наблюдений

По результатам полевых исследований для каждого цикла измерений методом ЭТ после инверсии данных был получен геоэлектрический разрез (Рис. 2.13).



Параметры обработки и инверсии были одинаковы для всех циклов. Разрезы по разным циклам имеют общие структурные особенности: трехслойное строение (верхний слой – около 1000 Ом·м, средний слой – от 4000 до 8000 Ом·м, нижний слой – менее 600 Ом·м), понижение сопротивления в районе ПК1730 и ПК2200, обусловленное наличием на этих пикетах двух вертикальных смотровых железобетонных шахт непосредственно вблизи линии профиля, и понижение сопротивления в правой части разреза (правее ПК2900) – в зоне правобережного примыкания, на которую оказывают влияние береговые отложения.

По результатам инверсии данных электротомографии проведена статистическая оценка сопротивлений исследуемого участка и построена диаграмма количественно-временного анализа: карта развития гистограмм распределения УЭС во времени (Рис. 2.14). Анализ развития гистограмм во времени показывает, что на них преимущественно наблюдается два основных пика, только в цикле IV вместо двух пиков зафиксирован один.



В данных циклов I-III первый и основной пик соответствует $\rho=1500$ Ом·м, а второй, побочный, с меньшей частотой, – $\rho=5000$ Ом·м, что отвечает неоднородности геоэлектрического строения КНП. В цикле IV более проводящий пик исчезает, а высокоомный пик незначительно смещается на $\rho=4500$ Ом·м и становится основным. Таким образом абсолютный максимум распределения смещается с 1500 Ом·м на 4500 Ом·м, что означает как общее, так и локальное повышение УЭС в теле КНП. А изменение формы гистограммы распределения с двумодальной

Однако подобный расчет разностных разрезов устраняет постоянную составляющую разреза, поэтому происходит полное подавление всех искажений от трехмерных неоднородностей, расположенных как на самом профиле, так и в стороне от него. Поэтому оставшиеся аномалии на разрезах интерпретировались, как изменения сопротивления геоэлектрического разреза во времени.

Общий средний фон изменений D_p на разностных разрезах близок к 0%, изменения касаются локальных областей.

На разрезах изменений УЭС приповерхностная зона (выше уровня ВБ) характеризуется малыми изменениями УЭС – преимущественно в пределах 5% (за исключением областей смотровых шахт). Возникновение приповерхностных изменений, вероятно, является следствием сезонных вариаций сопротивления и появлением локальных приповерхностных неоднородностей.

Сопротивления основания (ниже уровня НБ) снизились при наполнении водохранилища более чем на 10%, скорее всего, в результате обводнения этих зон в процессе наполнения и в результате оттаивания мерзлых областей при общем «растеплении» основания.

Сопротивления в зоне правобережного примыкания (правее ПК2800) также снизились при подъеме уровня воды более чем на 10%. При этом между циклами II и III и между циклами III и IV зафиксирован рост этой аномалии вверх: верхняя граница аномалии отвечает подъему уровня ВБ, что свидетельствует о постепенном обводнении отложений правого берега. Понижение сопротивлений в зонах смотровых шахт (ПК1730 и ПК2200) во всех циклах относительно цикла I составляет более 10%, это позволяет предположить, что шахты концентрируют фильтрующуюся в толще низовой грани воду. Данные аномалии совпадают с аномалиями метода ЕП, но не проявляются в параметрах воды, фильтрующейся через переходной слой.

Зоны, в которых сопротивление понижается во времени и которые расположены на абсолютных отметках от 138 м (УВ в нижнем бьефе) до 168 м (УВ в верхнем бьефе), являются потенциальными зонами развития фильтрационных процессов, которые могут быть обнаружены с помощью геоэлектрического контроля. Здесь расположены наиболее интересные аномальные зоны, развивающиеся в ходе наполнения водохранилища.

В интервале ПК1600–ПК1700 зафиксирована аномалия, проявившаяся между циклами II и III (она есть и между циклами I и III, но практически отсутствует между циклами I и II). В цикле IV наблюдается ее незначительный рост. Она располагается выше на отметках 160–190 м. Анализ этой аномалии по комплексу методов позволяет сделать предположение о развитии на участке процессов субвертикальной фильтрации, связанных с таянием погребенного снега и льда внутри КНП.

Между циклами I и II проявилась аномалия в интервале ПК1850–ПК1900, то есть на участке изливающейся дренажной скважины. Между циклами II и III отмечается рост этой ано-

малии. Однако в цикле IV она практически пропадает. Возникновение ее вызвано также процессами таяния.

Любопытным аномальным участком, выделенным по комплексу геоэлектрических исследований, является интервал ПК1300–ПК1500, в котором понижения УЭС между циклами по данным ЭТ по всему комплексу методов в рамках мониторинга одновременно отмечаются: минимальная температура фильтрующейся воды $t=3,3$ °С, минимальное сопротивление фильтрующейся воды 153 Ом·м и максимальная скорость изменения разности потенциалов $\Delta U_{\text{ЭП}}$, превышающая 200 мВ за 1 месяц (Технический отчет о..., 2012; Технический отчет о..., 2013). Можно предположить, что данный участок характеризуется повышенной интенсивностью процессов «растепления» и оттаивания. Выявленное на данном участке общее снижение температуры свидетельствует о притоке талой воды: в скважине, выполненной с бермы нижнего бьефа на ПК1730, отмечалась температура 0 °С в интервале отметок 174–178 м, а на ПК1180 в инклинометрической скважине переходной зоны была зафиксирована температура 4 °С.

Остальные локальные аномальные зоны, проявившиеся на разрезе изменений между циклами IV и I и расположенные непосредственно ниже уровня воды в верхнем бьефе, вызваны боковым влиянием воды в водохранилище на данные измерений с учетом неравномерной влажности КНП.

Коррекция влияния продольного рельефа путем ввода коэффициентов в кажущееся сопротивление

Для понимания постоянного строения геоэлектрического разреза, а не его временных изменений (а также в других случаях, если измерения проводятся однократно или нет возможности построить разностный разрез), необходимо анализировать просто разрезы УЭС вместо разностных разрезов. Для коррекции искажений в них, таким образом, требуется цифровая фильтрация или какая-либо другая обработка данных перед инверсией или в процессе нее.

В предыдущих разделах было отмечено, что в случае с работами на плотине, строение среды характеризуется наличием большого количества линейных сторонних продольных трехмерных неоднородностей, расположенных на разной глубине и разном расстоянии от профиля наблюдений на ее гребне, которые могут вызывать искажения в данных измерений. Для коррекции результата необходимо добавить шаг, на котором будет производиться минимизация искажений от таких продольных неоднородностей, если они имеют существенное влияние на данные.

Наиболее значимым искажающим фактором (продольной неоднородностью) при измерениях является рельеф откосов плотины. Он, во-первых, не является частью непосредственно изучаемой среды, в отличие от конструктивных элементов плотины, а во-вторых, наиболее кон-

трастен по УЭС. По этой причине именно рельеф плотины был выбран той отдельной продольной неоднородностью, на которой будет проводиться тестирование предложенного способа коррекции.

Оценка влияния продольного рельефа на данные и поиск способов его минимизации, в частности, являлись важными задачами при обследовании КНП Богучанской ГЭС.

Использование математического моделирования для коррекции влияния неоднородностей

Один из самых простых и быстрых способов подавления искажений от конкретных неоднородностей предложен в работе Vickery A., Hobbs B (2002). Он подразумевает устранение эффектов от приповерхностных неоднородностей с использованием поправочных коэффициентов кажущегося сопротивления для каждого разноса. Расчет поправочных коэффициентов производится на основе результатов расчета прямой задачи. А ее решение быстрее и проще всего можно получить, используя численное математическое моделирование. Преимущества: простота и локальное подавление только конкретной помехи с известными свойствами. Недостатки: необходимость знать параметры неоднородности-помехи и неполное подавление искажения.

Авторы применяют этот способ коррекции поля кажущихся сопротивлений для подавления эффектов от инженерных коммуникаций на профиле, а мое предложение заключается в применении того же способа для минимизации влияния продольных двумерных неоднородностей, расположенных вдоль профиля наблюдений и в стороне от него.

В случае продольной двумерной неоднородности, ее влияние на данные по параллельному ей профилю будет постоянным для каждой точки профиля, то есть не будет зависеть от координаты X (профиль вдоль оси X). Скорректированное за влияние нецелевой неоднородности-помехи кажущееся сопротивление тогда будет:

$$\rho(AO)_{\text{корр}} = \frac{\rho(AO)_{\text{э}}}{\alpha(AO)} \quad 2.4$$

где $\rho_{\text{э}}$ – это полученное после полевых измерений кажущееся сопротивление, а α – поправочный коэффициент, рассчитанный на основе решения прямой задачи; обе величины, очевидно, являются функцией разноса электроразведочной установки АО.

Для краткости обозначу нецелевые неоднородности - «помеха», а строение разреза - «цель». Тогда:

$$\rho(AO)_{\text{э}} \stackrel{\text{def}}{=} \rho(AO)_{\text{цель+помеха}} \quad 2.5$$

$$\alpha(AO) = \frac{\rho(AO)_{\text{помеха}}}{\rho_1} \quad 2.6$$

$$\rho(AO)_{\text{корр}} = \frac{\rho(AO)_{\text{цель+помеха}}}{\alpha(AO)} = \frac{\rho(AO)_{\text{цель+помеха}}}{\rho(AO)_{\text{помеха}}} \rho_1 \quad 2.7$$

где $\rho(AO)_{\text{помеха}}$ – кажущееся сопротивление, рассчитанное для модели однородного полупространства, включающего нецелевые продольные неоднородности, $\rho_1 = \text{const}$ – истинное сопротивление грунта в однородной модели полупространства при моделировании.

Для определения коэффициентов и коррекции поля кажущегося сопротивления необходимо знать $\rho(AO)_{\text{помеха}}$, именно этот параметр определяется на основе результатов моделирования. Однако для того, чтобы рассчитать прямую задачу для однородной модели полупространства, включающего только сторонние неоднородности, нужно знать их свойства и геометрию хотя бы оценочно. Поэтому для применения предлагаемого способа подавления помех существуют следующие необходимые условия:

- наличие нецелевых неоднородностей разреза (помех) с известной геометрией и свойствами (по крайней мере, относительной контрастностью);
- наличие алгоритма расчета трехмерной прямой задачи метода сопротивлений с заданной сетью наблюдений.

Предложенный способ интуитивно понятен, но недостаточно обоснован, и при данном способе коррекции:

$$\rho(AO)_{\text{корр}} \neq \rho(AO)_{\text{цель}} \quad 2.8$$

Поэтому этот способ не может полностью исключить влияние каких-либо помех, однако позволяет в значительной степени ослабить влияние искажающих факторов.

Постоянный продольный рельеф как частный случай продольной неоднородности

Известно, что давно существует численные способы учета рельефа по профилю (поперечного рельефа) при обработке данных традиционной двумерной электротомографии (Loke M., 1996-2009). Информация о рельефе по профилю учитывается в процессе инверсии, поэтому нет необходимости корректировать его влияние на этапе работы с псевдоразрезом. Однако при двумерной инверсии невозможно учесть влияние объектов вне профиля (они исключаются двумерным приближением), и в том числе продольного рельефа. А зачастую именно он является важным искажающим элементом.

Учитывать продольную составляющую рельефа тем удобнее, что известны все свойства и параметры этого искажающего фактора. Действительно, если рельеф принимать за неоднородность изучаемой среды, то известна не только ее геометрия, которую можно получить в результате топографической съемки, но и контрастность по отношению к остальному разрезу, которая всегда бесконечна (так как $\rho_{\text{воздух}} \rightarrow \infty$). Влияние такой неоднородности можно рассчитать с высокой точностью с помощью численного решения прямой задачи от однородной модели полупространства, включающей только продольный рельеф.

Если сторонней неоднородностью является только рельеф, то:

$$\rho(AO)_{\text{помеха}} \stackrel{\text{def}}{=} \rho(AO)_{\text{рельеф}} \quad 2.9$$

Тогда для учета влияния рельефа формулы 2.6

2.6 и 2.7 принимают вид:

$$\alpha(AO) = \frac{\rho(AO)_{\text{рельеф}}}{\rho_1} \quad 2.10$$

$$\rho(AO)_{\text{корр}} = \frac{\rho(AO)_{\text{цель+рельеф}}}{\alpha(AO)} = \frac{\rho(AO)_{\text{цель+рельеф}}}{\rho(AO)_{\text{рельеф}}} \quad 2.11$$

Таким образом, продольный рельеф является частным случаем двумерной продольной неоднородности с известной контрастностью по отношению к остальным элементам модели среды.

Коррекция влияния продольного рельефа каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС

После проведения измерений методом электротомографии по профилю на гребне КНП Богучанской ГЭС и обработки данных выявлены некоторые особенности геоэлектрического разреза (Рис. 2.19 – для примера выбран разрез по циклу измерений IV, разрезы по всем циклам – Рис. 2.13). Более подробно результаты описаны предыдущем разделе, посвященном режимным наблюдениям.

Влияние продольного рельефа должно выражаться в постоянной составляющей на геоэлектрическом разрезе – горизонтально-слоистой неоднородности. Поэтому внимание обращено принципиально на наличие в строении разрезов двух горизонтальных границ. Горизонтальная граница на отметке 130 м между вторым и третьим слоем обусловлена наличием границы между телом КНП и породами основания. Она подтверждается схемами и планами сооружения. Верхняя же граница на отметке 190 м не имеет соответствия на инженерных схемах и, на первый взгляд, отражает неоднородность грунтов, уложенных в тело КНП. Вторым вариантом интерпретации может быть сезонное колебание влажности верхнего слоя укладки. Но также наличие границы может быть обусловлено не неоднородностью грунтов, а влиянием формы контура откосов – продольного рельефа плотины. Неправильная интерпретация строения искаженного разреза может, в свою очередь, привести к пропуску целевых продольных фильтрационных аномалий пониженного сопротивления, медленно развивающихся во времени.

Но даже если появление границы на отметке 190 м обусловлено не только влиянием продольного рельефа плотины, оно все равно является очевидным фактором, искажающим верхнюю часть разреза, который следует исключить перед интерпретацией.

Поскольку на данном сооружении рельеф был постоянным вдоль оси гребня КНП и линии профиля, такой рельеф во введенной ранее классификации – это двумерная продольная неоднородность. Это дало возможность использовать для расчета требуемых поправочных коэффициентов программу IE2DP2 (Электрическое зондирование..., 1988), позволяющую проводить математическое моделирование методом МИУ. Алгоритм данной программы позволяет проводить

моделирование для линейных электроразведочных установок, ось которых перпендикулярна к оси двумерной модели.

Расчет был проведен для трех различных моделей (Рис. 2.16, точка записи отмечена звездочкой):

1. Модель 1 – среда с двумя горизонтальными слоями разного сопротивления с рельефом, контраст сопротивлений слоев $\rho_1/\rho_2=2$;
2. Модель 2 – однородная по сопротивлению модель с рельефом;
3. Модель 3 – среда с двумя горизонтальными слоями разного сопротивления без рельефа (неоднородное полупространство), контраст сопротивлений слоев $\rho_1/\rho_2=2$.

Конфигурация и форма рельефа в Моделях 1-2 также соответствовала продольному рельефу реальной каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС. Отмечу, что модели сильно упрощены, но схожи по строению рельефа с точными моделями КНП на Рис. 2.9.

Параметры системы наблюдения и моделей при моделировании были

выбраны в соответствии с использованными при полевых работах:

- Моделирование измерений для одной точки записи электротомографии = точки ВЭЗ;
- Продольная трехэлектродная комбинированная установка Шлюмберже Amn+mnV (ось установки направлена перпендикулярно плоскости моделей);
- Минимальный и максимальный разности АО 15 м и 300 м соответственно;

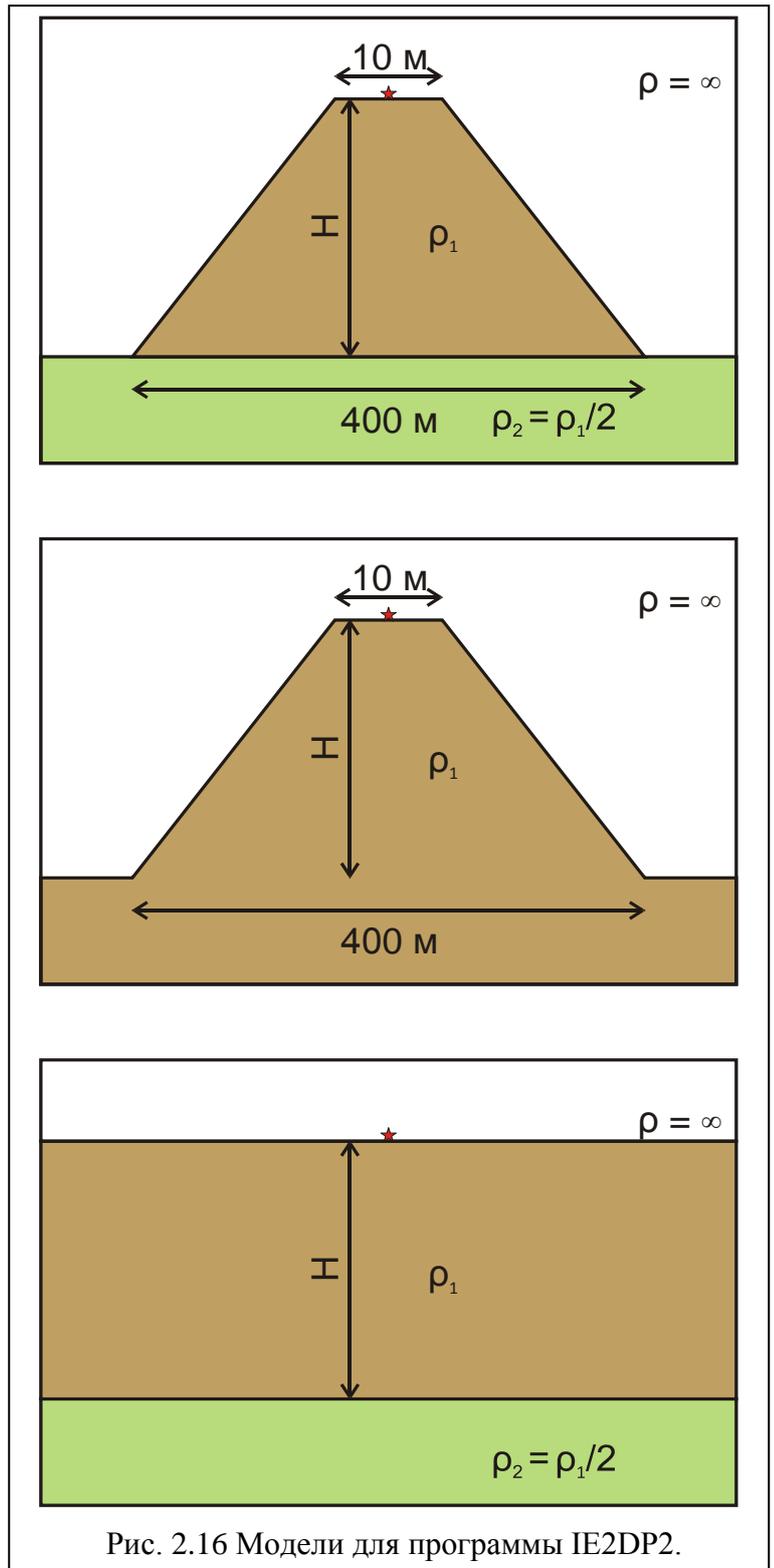


Рис. 2.16 Модели для программы IE2DP2.

- Сопротивление блоков, имитирующих воздух, $\rho_{\text{воздух}}=99999 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – максимально возможное для программы ($\rho_{\text{воздух}} \rightarrow \infty$ по сравнению с сопротивлением блоков грунта);
- $\rho_1=1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_2=750 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $H=80 \text{ м}$.

Для расчета коэффициентов и скорректированного кажущегося сопротивления были использованы формулы 2.10 и 2.11, приведенные выше.

На Рис. 2.17 представлены результаты моделирования – четыре кривые ВЭЗ:

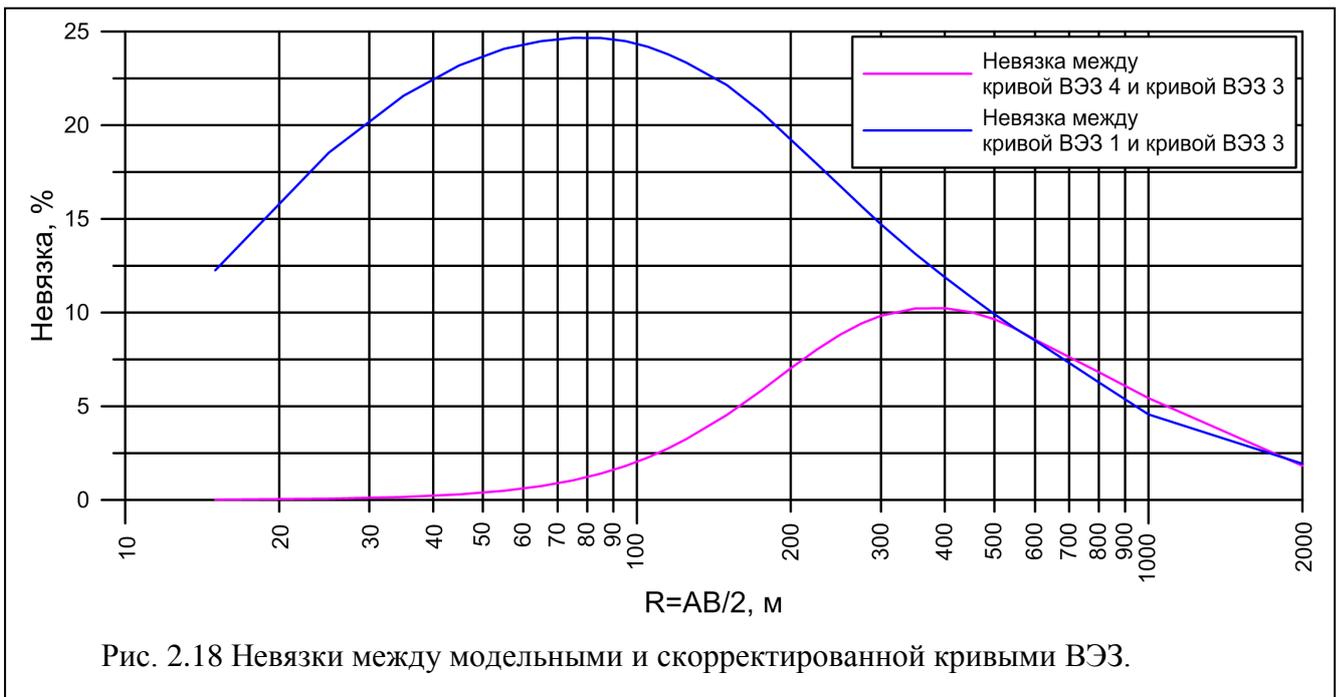
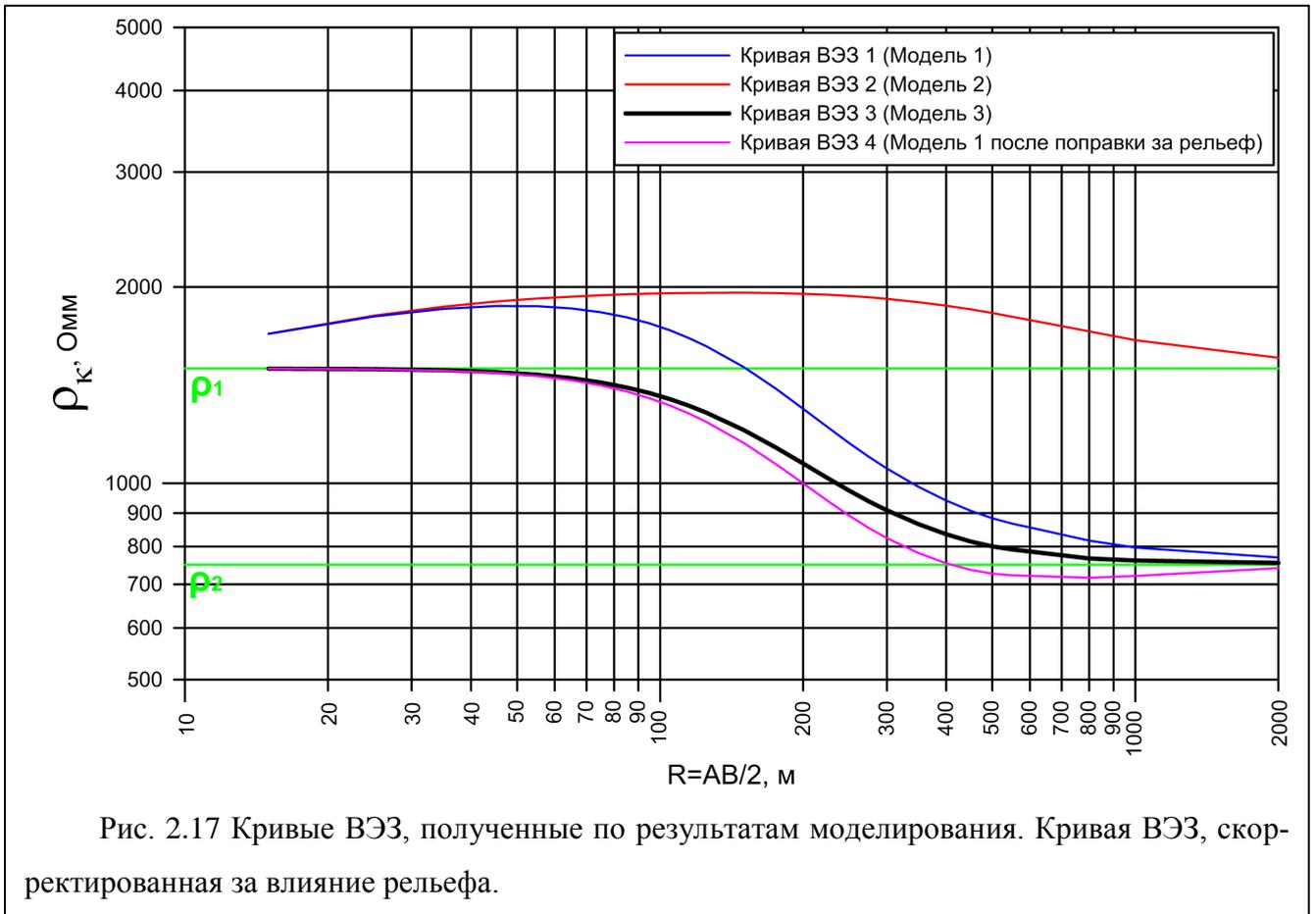
1. Кривая ВЭЗ 1 – для Модели 1, она может быть получена при реальных измерениях на участке с продольным рельефом и неоднородностью исследуемой среды;
2. Кривая ВЭЗ 2 – для Модели 2, она позволила рассчитать поправочный коэффициент для учета влияния продольного рельефа;
3. Кривая ВЭЗ 3 – для Модели 3, она отражает целевую модель неоднородной среды без рельефа (полупространство), кроме того, на такой модели основана дальнейшая обработка данных электротомографии (автоматическая инверсия);
4. Кривая ВЭЗ 4 (скорректированная) – для Модели 3 с введенными поправочными коэффициентами на каждом разnose.

Даже при визуальном анализе видно (Рис. 2.17), что ввод поправочного коэффициента в кривую ВЭЗ, полученную от модели с целевой неоднородностью и рельефом, значительно приближает ее к кривой ВЭЗ от двухслойной модели без рельефа (Модель 3). Особенно явное преимущество введения поправки наблюдается в верхней части разреза на небольших разносах, где влияние продольного рельефа, очевидно, больше. Этот вывод подтверждается расчетами невязки между кривыми отдельно на каждом разnose (Рис. 2.18). Формула для расчета невязки между двумя кривыми:

$$\rho_{\%} = \frac{\rho_i - \rho_j}{\frac{\rho_i + \rho_j}{2}} \cdot 100\% = 2 \cdot \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \cdot 100\%, \quad 2.12$$

где ρ_i – значение кажущегося сопротивления на определенном разnose на одной кривой, где ρ_j – значение кажущегося сопротивления на том же разnose на второй кривой.

Параметры сети наблюдений и форма рельефа в моделях при моделировании были выбраны на основе проведенных полевых исследований и условий проведения работ. Это позволило использовать рассчитанные по результатам моделирования Модели 2 коэффициенты для коррекции реальных полевых данных, полученных на профиле ЭТ вдоль гребня высотной каменно-набросной плотины.



На Рис. 2.19 показаны два геоэлектрических разреза после двумерной автоматической инверсии данных электротомографии для цикла IV. На верхнем рисунке (Рис. 2.19А) изображен разрез по исходным данным, на нижнем (Рис. 2.19Б) – разрез по данным с введенной поправкой за влияние рельефа. Предположение о том, что верхняя горизонтальная граница на разрезе (на отметке 190 м) является следствием влияния рельефа, не подтвердилась, поскольку после кор-

рекции граница не исчезла и не изменила положения. Поэтому ее наличие, вероятно, связано с вертикальной неоднородностью грунтов, уложенных в тело КНП, или с влиянием продольных неоднородностей в конструкции плотины. Однако стоит отметить, что контрастность после введения поправки уменьшилась, и геоэлектрический разрез стал более однородным и гладким по сопротивлению.

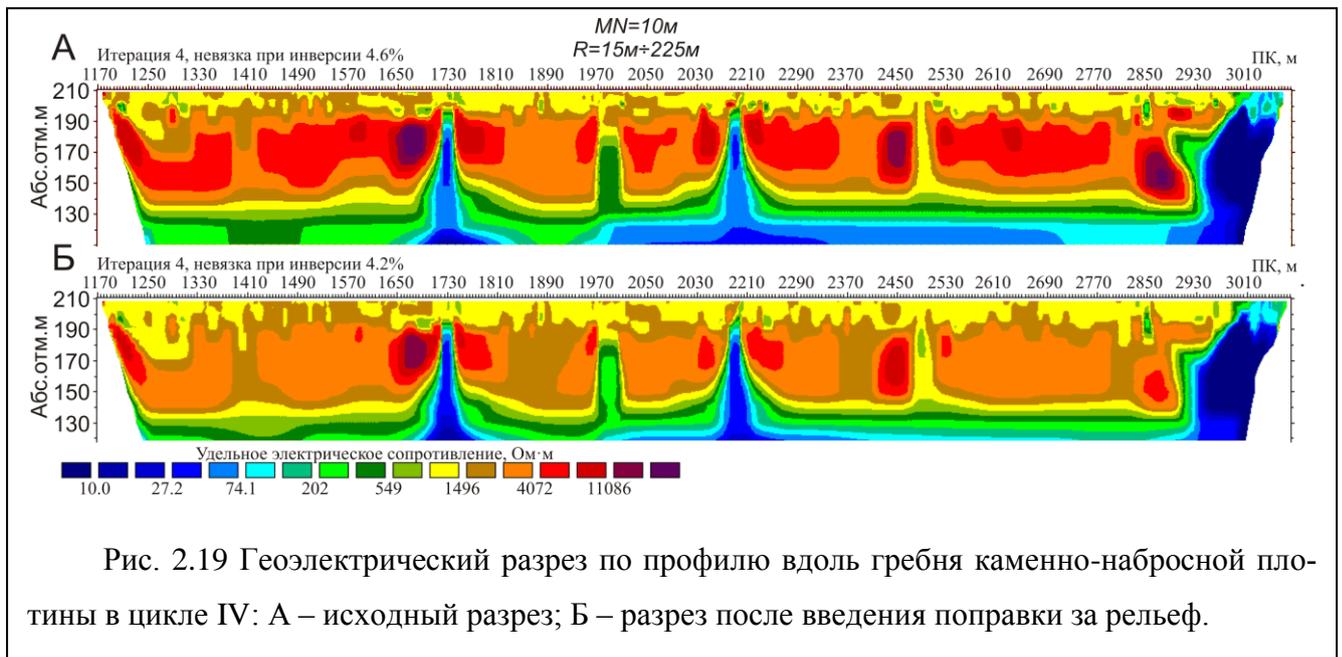


Рис. 2.19 Геоэлектрический разрез по профилю вдоль гребня каменно-набросной плотины в цикле IV: А – исходный разрез; Б – разрез после введения поправки за рельеф.

Выводы

Приведенный пример режимных исследований на КНП Богучанской ГЭС, непрерывно проводимых с 2011 по 2013 года (и в 2014 также продолжаются работы), демонстрирует, насколько геофизические исследования широко распространены при обследовании линейно протяженных плотин для выявления ослабленных зон, областей повышенной трещиноватости и обводненности и развивающихся во времени фильтрационных процессов.

Сопоставление результатов исследований КНП Богучанской ГЭС в ходе первого наполнения водохранилища, позволило сделать следующие выводы:

- 1) наблюдаемое на геоэлектрических разрезах снижение сопротивлений для разных циклов измерений связано с общим обводнением основания и правого берега при наполнении водохранилища и повышении уровня в верхнем бьефе и с фильтрацией воды в толще плотины;
- 2) в теле КНП не отмечается развития крупномасштабных фильтрационных процессов, связанных с нарушением целостности АД;
- 3) не наблюдается фильтрационных процессов в зоне сопряжения с бетонной плотиной (ПК1170);

- 4) все фильтрационные процессы в толще плотины обусловлены сезонными осадками и таянием погребенного снега при «растеплении» тела плотины.

Хотя мы пока не тестировали вышеописанную методику ввода поправок на более неоднородных моделях с более сложной конфигурацией рельефа, в целом, можно утверждать, что результаты геоэлектрических профильных наблюдений можно скорректировать и улучшить с помощью введения поправки за продольный рельеф, рассчитанной с помощью численного моделирования. В каждом случае такой коррекции необходимо контролировать полученные результаты с помощью также численного моделирования или комплексирования с другими методами.

В частном примере предположение о том, что одна из горизонтальных границ разреза является следствием влияния рельефа, не подтвердилась, поскольку после коррекции граница не исчезла и не изменила положения. Вероятно, она обусловлена вертикальной неоднородностью грунтов, уложенных в тело КНП, или с влиянием продольных неоднородностей в конструкции плотины. Однако стоит отметить, что контрастность неоднородностей после введения поправки уменьшилась, и геоэлектрический разрез стал более однородным и гладким по сопротивлению.

4. Выводы по Главе

Для определения влияния трехмерного строения среды на данные двумерной электротомографии по профилю:

1. Была предложена классификация типов неоднородностей, основанная на пространственной геометрии объектов и их расположении относительно профиля наблюдений. Для каждого типа описаны возможные варианты искажений, возникающие в двумерных данных. Все типы неоднородностей часто встречаются при реальных геофизических изысканиях. Показано два реальных примера исследований с различными типами неоднородностей.

2. При моделировании для обоснования исследования карстово-суффозионных пустот в Гватемале методом электротомографии был выявлен важный эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного высокоомного объекта. Это существенно усложняет интерпретацию результатов измерений над такими объектами. Более точная по глубине модель получается при трехмерной инверсии набора параллельных профилей над тем же трехмерным объектом.

3. Разработанная система для режимных наблюдений на гребне КНП Богучанской ГЭС показала свою принципиальную пригодность для оперативного контроля фильтрационных процессов в толще грунтовых плотин. На основе моделирования были оценены величины УЭС конструктивных элементов плотины и вклад таких факторов, как наличие изолирующих и проводящих включений, частичное обводнение тела КНП со стороны верхнего бьефа при подъеме уровня воды.

4. Электротомография может успешно применяться с целью прослеживания развития зон незначительного (на 5–10%) снижения сопротивления при мониторинге фильтрационных процессов в теле грунтовой плотины на фоне подъема уровня воды в водохранилище. Аномальные зоны на профиле вдоль гребня плотины можно выделить, в основном, по их двумерному характеру, а не по амплитуде изменения сопротивления, поскольку эффекты, возникающие при фильтрации, по амплитуде сопоставимы с уровнем помех от продольных неоднородностей (влиянием рельефа и структурных особенностей КНП, обводнением тела КНП и основания и др.). Для определения причин возникновения фильтрационного процесса (таяния, локального «растепления», нарушения целостности АБД) было проведено комплексирование ЭТ с другими геофизическими и инженерными методами (ЕП, резистивиметрией и термометрией). Результаты режимных наблюдений позволили определить и описать следующие два, по-видимому, мало известных ранее явления, возникающих при наполнении водохранилища, расположенного в зоне пониженных среднегодовых температур:

- 1) Таяние мерзлых включений и субвертикальная фильтрация в теле плотины. Сопоставление участков аномального снижения УЭС, проявившихся выше уровня воды в верхнем бьефе, с данными по термометрии и минерализации фильтрующейся воды показало связь таких аномалий УЭС с процессами субвертикальной фильтрации при таянии мерзлых включений в теле плотины.
- 2) «Растепление» и обводнение основания. Значительное снижение УЭС скального основания плотины при повышении уровня воды в верхнем бьефе (ВБ) может быть объяснено не только увеличением обводненной площади со стороны ВБ, но и «растеплением» ложа водохранилища и обводнением основания: на локальных участках было зафиксировано понижение температуры из-за притока талой воды, а отмеченное при мониторинге снижение УЭС основания при наполнении подтвердилось результатами математического моделирования.

5. При проведении моделирования в рамках исследований на гребне каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС был выявлен эффект влияния продольного рельефа на данные двумерной электротомографии по профилю. Способ введения в кажущееся сопротивление на каждом разносе коэффициентов, рассчитанных при помощи моделирования, показал хорошие результаты при коррекции продольного рельефа плотины. Метод может применяться для других объектов с простой геометрией и известной контрастностью, однако в каждом случае необходима контроль полученного результата и оценка его невязки в сравнении с исходными данными.

Глава 3. Теория пространственных инвариантов при обработке данных метода СГ

1. Теория пространственных инвариантов в методе ЭП-СГ

Метод электрического профилирования в варианте срединного градиента (ЭП-СГ, просто СГ) предназначен для картирования аномальных по сопротивлению объектов в плане. Метод наиболее чувствителен к горизонтальным изменениям удельного электрического сопротивления в верхней части разреза. Известный «эффект зондирования», проявляющийся в данных СГ при фиксированном положении питающей линии из-за движения приемной линии по площади, по сравнению с влиянием горизонтальных изменений УЭС можно считать пренебрежимо малым, особенно, при детальных малоуглубинных исследованиях и, соответственно, небольших размерах планшетов и разносов (питающей и приемной линии).

Таким образом, в общем случае метод СГ позволяет определять плановое положение локальных и линейно протяженных объектов, а значит, может использоваться для картирования трехмерно неоднородных сред без расчленения разреза по глубине.

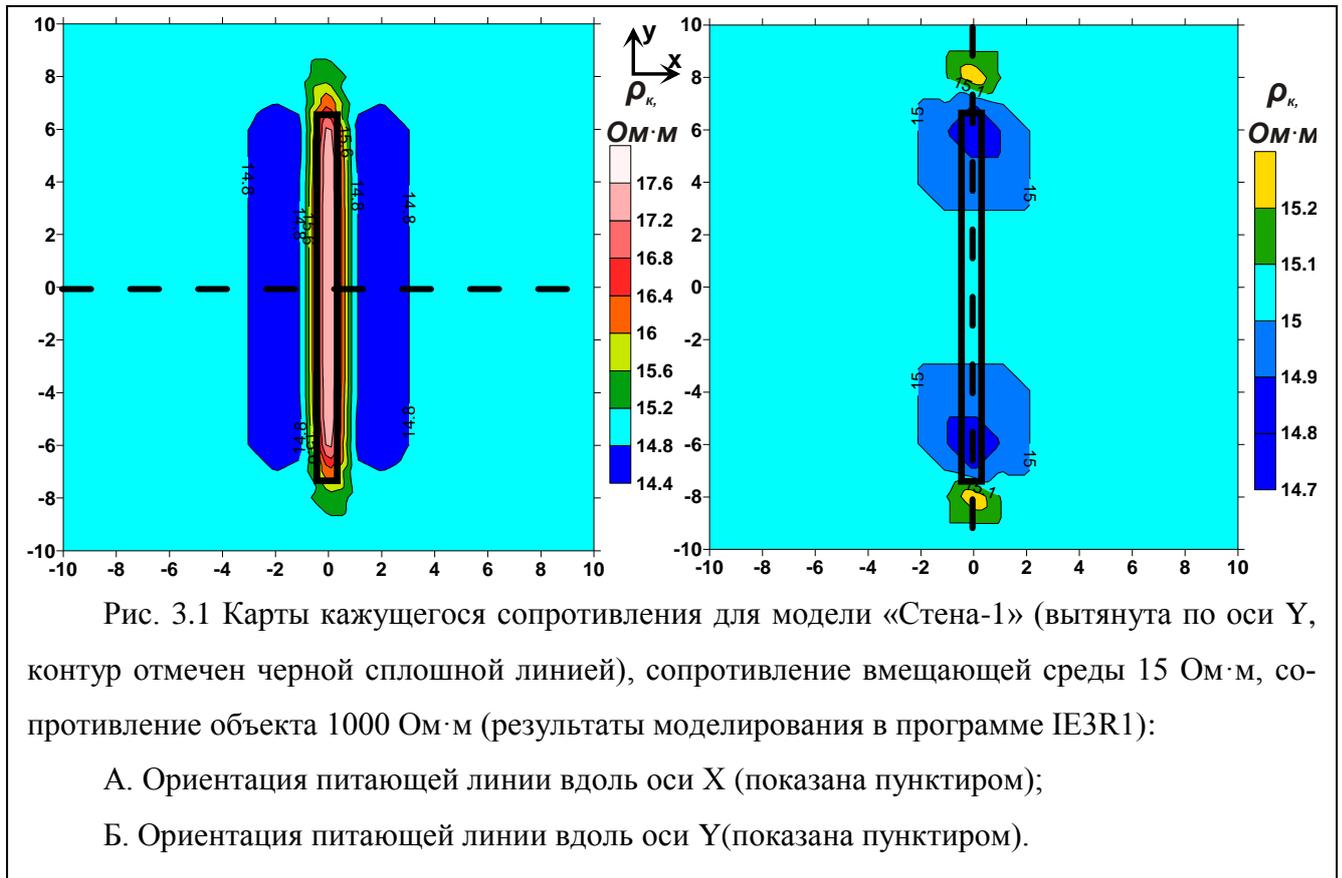
Зависимость кажущегося сопротивления от поляризации аномального объекта

Возникновение идеи использовать теорию пространственных инвариантов при обработке данных метода СГ основано на существовании зависимости кажущегося сопротивления от геометрии аномального объекта и направления тока в питающей линии.

Общая суть вопроса такова. При работах методом СГ используется, в общем случае, одна постоянная питающая линия с фиксированным положением питающих электродов – одно горизонтальное направление поляризации исследуемой среды. Однако при проведении полевых исследований было отмечено, что линейно протяженный высокоомный объект наиболее чувствителен к перпендикулярному распространению тока в окружающей среде и практически нечувствителен к продольному. Этот эффект обусловлен «обтеканием» током объекта, линейно вытянутого вдоль преимущественного направления силовых линий тока (Рис. 3.1.). Поэтому при использовании одной фиксированной питающей линии в методе СГ (одного направления поляризации) все высокоомные объекты, ориентированные вдоль направления питающей линии, будут иметь небольшой аномальный эффект и могут быть пропущены при картировании. Для их выявления необходимо использование другой поляризации – другого направления питающей линии, отличного от продольного.

Таким образом, при исследованиях возможностей метода СГ при картировании было выяснено, что для надежного выявления и картирования аномалий повышенного сопротивления

от объектов различной конфигурации на одном планшете необходимо использовать две перпендикулярные питающие линии. Вычисление на точке среднего геометрического из 2-х значений позволяет пренебречь зависимостью кажущегося сопротивления от геометрии аномального объекта.



Теория пространственных инвариантов

Проведенные венгерскими геофизиками теоретические и полевые исследования рядом с Цистерианским монастырем (30 км к северу от Будапешта, Венгрия) позволяют шире взглянуть на проблему (Varga M. et al., 2008). Они предлагают развить методику измерений с двумя питающими линиями, подкрепив ее теоретической и математической базами, до теории пространственных инвариантов. В своем исследовании они рассматривают лишь горизонтальные компоненты всех векторов. Это в данном случае целесообразно потому что, во-первых, искомые объекты априорно являются 2D (или 3D) неоднородностями, а во-вторых, при площадной съемке вертикальная компонента не измеряется и не учитывается.

Известно, что закон Ома в дифференциальной форме связывает напряженность электрического поля \vec{E} и плотность тока \vec{j} . Коэффициентом пропорциональности двух этих величин является сопротивление ρ . В общем случае электрическое поле и плотность тока являются неколлинеарными векторами, поэтому величина ρ является тензором:

$$\vec{E} = \rho \vec{j} \quad 3.1$$

$$\hat{\rho} = \begin{bmatrix} \rho^{xx} & \rho^{xy} \\ \rho^{yx} & \rho^{yy} \end{bmatrix} \quad 3.2$$

Сначала определим плотность тока \vec{j} . Имея питающие электроды А и В и силу тока в питающей линии \vec{I} (А:+I, В:-I), можно определить горизонтальную компоненту вектора плотности тока в точке измерения как:

$$\vec{J}_{AB} = \frac{\vec{I}}{2\pi} \left(\frac{\vec{r}_A}{r_A^3} - \frac{\vec{r}_B}{r_B^3} \right), \quad 3.3$$

где относительные координаты точки измерений определены с помощью радиус-векторов \vec{r}_A и \vec{r}_B , направленных от соответствующего питающего электрода к точке измерения.

Если затем задать два направления расположения питающих линий, общее количество полученных уравнений для расчета компонент электрического поля \vec{E} будет соответствовать количеству элементов. Пусть индексы 1 и 2 относятся к используемой питающей линии АВ, тогда уравнений будет четыре и они будут выглядеть следующим образом:

$$E_1^x = \rho^{xx} j_1^x + \rho^{xy} j_1^y \quad 3.4$$

$$E_2^x = \rho^{xx} j_2^x + \rho^{xy} j_2^y \quad 3.5$$

$$E_1^y = \rho^{yx} j_1^x + \rho^{yy} j_1^y \quad 3.6$$

$$E_2^y = \rho^{yx} j_2^x + \rho^{yy} j_2^y \quad 3.7$$

Тогда тензор кажущегося сопротивления задается как (Varga M. et al., 2008):

$$\hat{\rho}_k = \begin{bmatrix} \rho_k^{xx} & \rho_k^{xy} \\ \rho_k^{yx} & \rho_k^{yy} \end{bmatrix} = \frac{1}{(j_1^x j_2^y - j_1^y j_2^x)} \begin{bmatrix} E_1^x j_2^y - E_2^x j_1^y & E_2^x j_1^x - E_1^x j_2^x \\ E_1^y j_2^y - E_2^y j_1^y & E_2^y j_1^x - E_1^y j_2^x \end{bmatrix} \quad 3.8$$

После того, как задан тензор кажущегося сопротивления, для исследования результатов съемки удобно пользоваться его пространственными инвариантами. Инварианты не зависят от направления тока, поэтому на картах кажущегося сопротивления, основанных на инвариантах, видны аномалии, отражающие реальную геометрию приповерхностных неоднородностей.

Для тензора при постоянном токе с 2x2 реальными элементами в общем виде можно определить бесконечное число наборов таких инвариантов, но в самом простом случае метода сопротивлений на постоянном токе, более понятны будут три из них: детерминант ρ_k^{det} , сумма квадратов всех элементов ρ_k^{ssq} и след ρ_k^{trace} . Соответствующие определения сопротивлений следующие:

$$\rho_K^{det} = (\det \widehat{\rho}_K)^{1/2} = (\rho_K^{xx} \rho_K^{yy} - \rho_K^{xy} \rho_K^{yx})^{1/2} \quad 3.9$$

$$\rho_K^{ssq} = (1/2 \text{ssq} \widehat{\rho}_K)^{1/2} = [1/2 ((\rho_K^{xx})^2 + (\rho_K^{xy})^2 + (\rho_K^{yx})^2 + (\rho_K^{yy})^2)]^{1/2} \quad 3.10$$

$$\rho_K^{trace} = 1/2 (\text{trace} \widehat{\rho}_K) = 1/2 (\rho_K^{xx} + \rho_K^{yy}) \quad 3.11$$

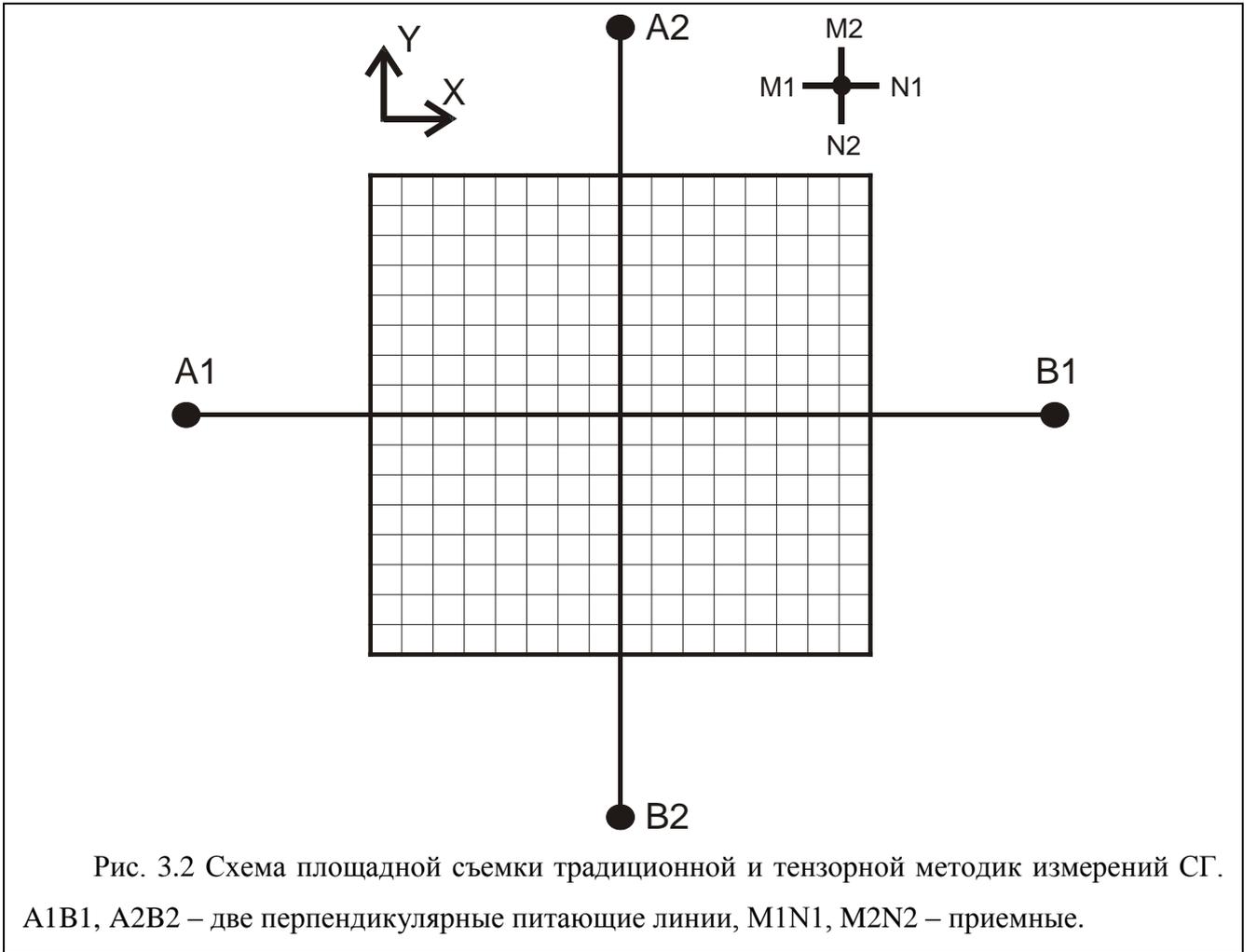
Вычисленные по любой из этих формул инварианты имеют смысл и размерность кажущегося сопротивления, учитывающего особенности поляризации аномальных объектов различной конфигурации. При интерпретации результатов вместо карт кажущегося сопротивления целесообразно анализировать карты инвариантов.

2. Методики измерений с двумя питающими линиями в методе ЭП-СГ

Традиционная и тензорная методики

При проведении геофизических работ на археологических объектах методом ЭП-СГ в электроразведке в большинстве случаев на кафедре электроразведки геологического факультета МГУ используется специальная методика (Модин И.Н. и др., 2006; Горбунов А.А. и др., 2001). Она заключается в том, что на каждом планшете площадная съемка производится дважды поочередно с двумя разными ориентировками питающей линии **AB**, перпендикулярными друг к другу (Рис. 3.2.) При этом для каждой сетки наблюдений меняется ориентировка и приемной линии MN (она всегда параллельна питающей), и направление профилей, однако узлы сетки – точки записи измеряемых данных – не меняются. После проведения измерений для каждой точки получается 2 значения сопротивления. Для составления единой карты в каждой точке берется чаще всего геометрическое среднее двух значений кажущегося сопротивления. Такую методику я буду называть в дальнейшем традиционной.

В рамках же теории пространственных инвариантов для вычисления инвариантов тензора кажущегося сопротивления необходимо знать все 4 компоненты. А это означает, что при полевых работах нужно иметь на каждой точке 4 измерения: используется так же, как и в традиционном варианте, две перпендикулярные питающие линии, но на каждой точке измерения проводятся, соответственно, в двух перпендикулярных направлениях. Авторы статьи (Varga M. et al., 2008) назвали это тензорной методикой съемки ЭП-СГ (Рис. 3.2). Таким образом, получаются все 4 компоненты: ρ_K^{ik} , где $i, k = x, y$; первый подстрочный индекс указывает на расположение питающей линии параллельно оси i , а второй индекс на расположение приемной линии параллельно оси i , и каждая компонента имеет свое физическое значение.



Однако экспериментально на основе полевых наблюдений было выяснено (Varga M. et al., 2008), что детерминант $\rho_K^{det} ann$, сумма квадратов всех элементов $\rho_K^{ssq} ann$ и след $\rho_K^{trace} ann$, рассчитанные только с использованием главных компонент ρ_K^{xx} и ρ_K^{yy} для линий, ориентированных вкрест и вдоль простирания линейного объекта, хорошо аппроксимируют точные значения, поскольку второстепенные компоненты ρ_K^{xy} и ρ_K^{yx} принимают близкие к 0 значения и ими можно пренебречь:

$$\rho_K^{det} ann = (\rho_K^{xx} \rho_K^{yy})^{1/2} \sim \rho_K^{det} \quad 3.12$$

$$\rho_K^{ssq} ann = [1/2 (\rho_K^{xx})^2 + 1/2 (\rho_K^{yy})^2]^{1/2} \sim \rho_K^{ssq} \quad 3.13$$

$$\rho_K^{trace} ann = 1/2 (\rho_K^{xx} + \rho_K^{yy}) \sim \rho_K^{trace} \quad 3.14$$

В таком сокращенном представлении пространственных инвариантов участвует только 2 главные компоненты, и, как видно из формул, в аппроксимативном упрощенном виде инварианты представляют из себя геометрическое среднее ($\rho_K^{det} ann$), корень суммы квадратов ($\rho_K^{ssq} ann$) и арифметическое среднее ($\rho_K^{trace} ann$). Это упрощение позволяет, во-первых, значительно уменьшить объем производственных работ, а во-вторых, сократить вычисления и уве-

личить скорость обработки. И, таким образом, пренебрегая второстепенными компонентами, тензорная методика сводится к вышеописанной традиционной методике ЭП-СГ.

В моей бакалаврской работе (Павлова А.М., 2009) в том числе было показано, что принципиальной разницы между инвариантами с точки зрения картирования объектов нет. Это означает, что при обработке данных метода СГ с двумя питающими линиями можно пользоваться любым из них. Поэтому в дальнейшем при обработке полевых данных мне показалось правильным использовать инвариант ρ_K^{det} , так как он совпадает с давно используемым при обработке в данных традиционной методики средним геометрическим при условии, что в расчете участвуют только главные компоненты тензора.

3. Расчет аномальных эффектов от высокоомных линейных объектов разной ориентации в методе ЭП-СГ при помощи математического моделирования методом МИУ

Выше уже говорилось о зависимости аномалии линейных объектов от ориентации тока, и о пользе инварианта детерминанта (среднего геометрического) для визуализации результатов. Инвариант рассматривался для двух перпендикулярных питающих линий, ориентированных вкрест и вдоль главной оси линейного объекта (его простирания). Однако в области исследования может, во-первых, находиться несколько объектов с разным простиранием, а во-вторых, даже если объект один, то его простирание заранее неизвестно. Поэтому невозможно выбрать начальное направление питающих линий так, чтобы она располагались вдоль и вкрест простирания объектов. Таким образом, при полевых работах в общем случае питающие линии повернуты под разными неизвестными углами относительно каждого линейного аномального объекта в области исследования, и важным является вопрос, зависит ли итоговая аномалия кажущегося сопротивления и рассчитанные аномалии инвариантов от ориентации двух питающих линий относительно расположения объектов.

Также при анализе экспериментальных данных венгерские геофизики показали, что второстепенными компонентами тензора кажущегося сопротивления можно пренебречь. Этот вывод был сделан венграми в результате физического моделирования при ориентации двух питающих линий вкрест и вдоль линейного аномального объекта с известным простиранием. Однако при произвольной ориентации питающих линий это может быть не так, поэтому я поставила цель выяснить, какой вклад вносят второстепенные компоненты в инвариант и можно ли пренебрегать ими в общем случае при произвольной ориентации питающих линий относительно объектов.

Для решения поставленных задач было решено провести численное математическое моделирование в программе IE3R1 (Инструкция к программе IE3R1, 1991). Алгоритм программы подразумевает расчет прямой задачи методом интегральных уравнений (МИУ) (Смирнова

Т.Ю., 1994; Модин И.Н., 2010) и учитывает необходимые в данной работе особенности поляризации линейных объектов (Электрическое зондирование..., 1992; Электрическое зондирование..., 1988).

Параметры модели

В качестве аномального объекта была выбрана модель «Стены» (Рис. 3.3). Параметры:

- размеры 9.5 м x 9.5 м, толщина и высота стен 0.5 м, глубина залегания 0.5 м;
- сопротивление объекта 1000 Ом·м, сопротивление вмещающих пород 15 Ом·м;
- площадь наблюдений 10м x 10м по сети 1м x 1м;
- MN=1м, АВ=60м.

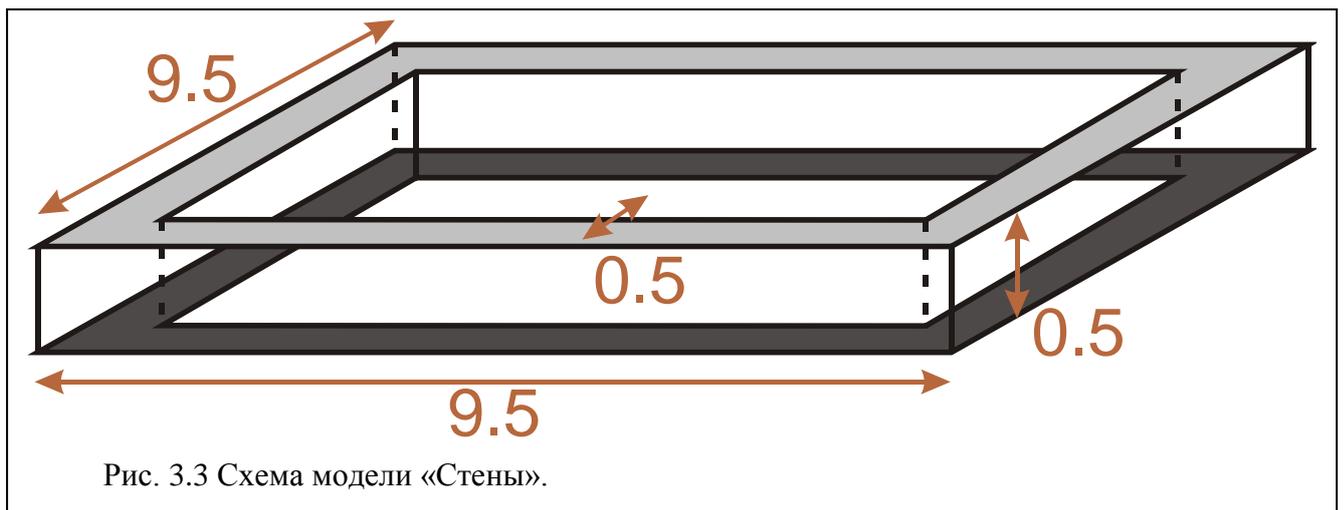
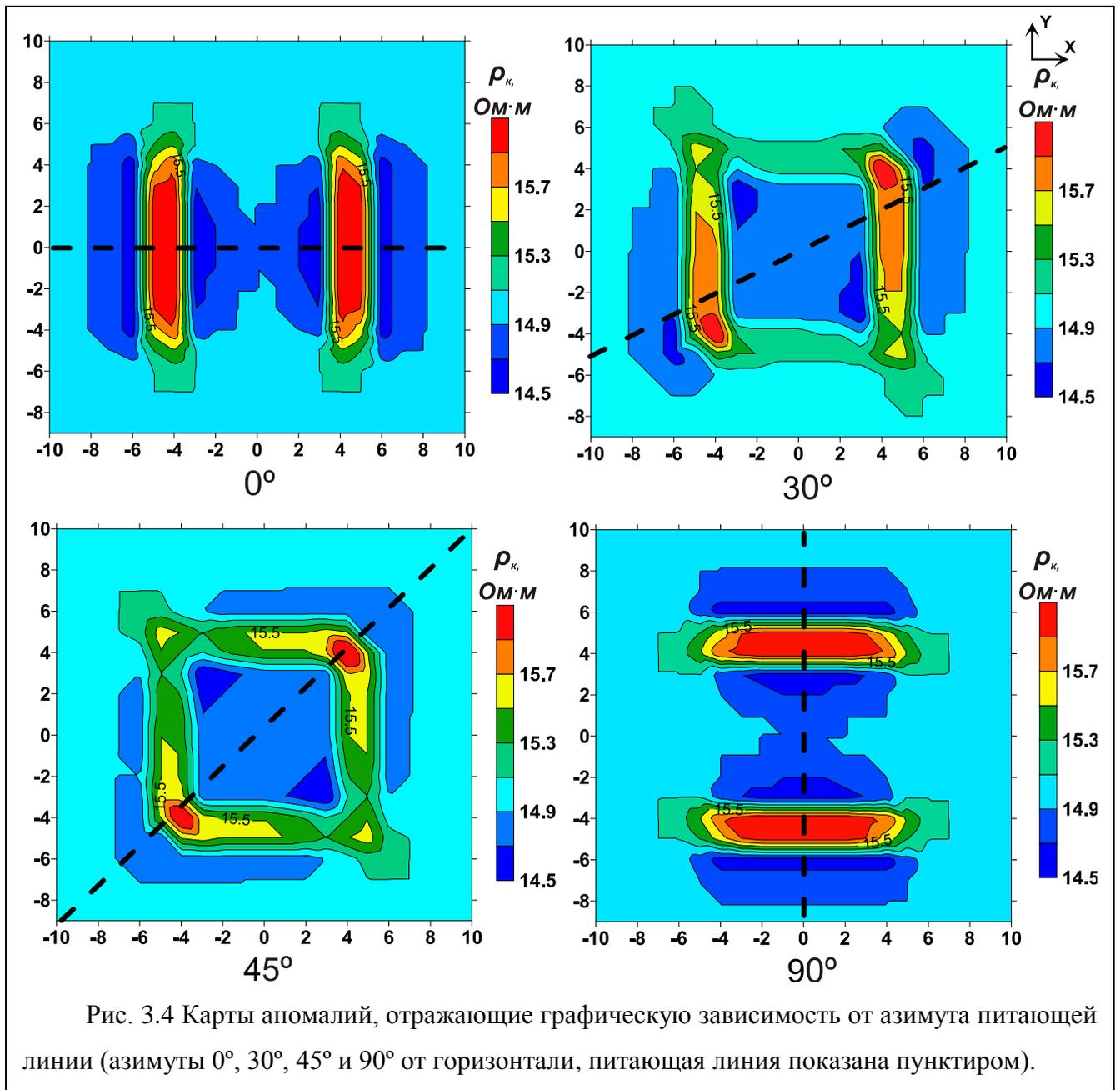


Рис. 3.3 Схема модели «Стены».

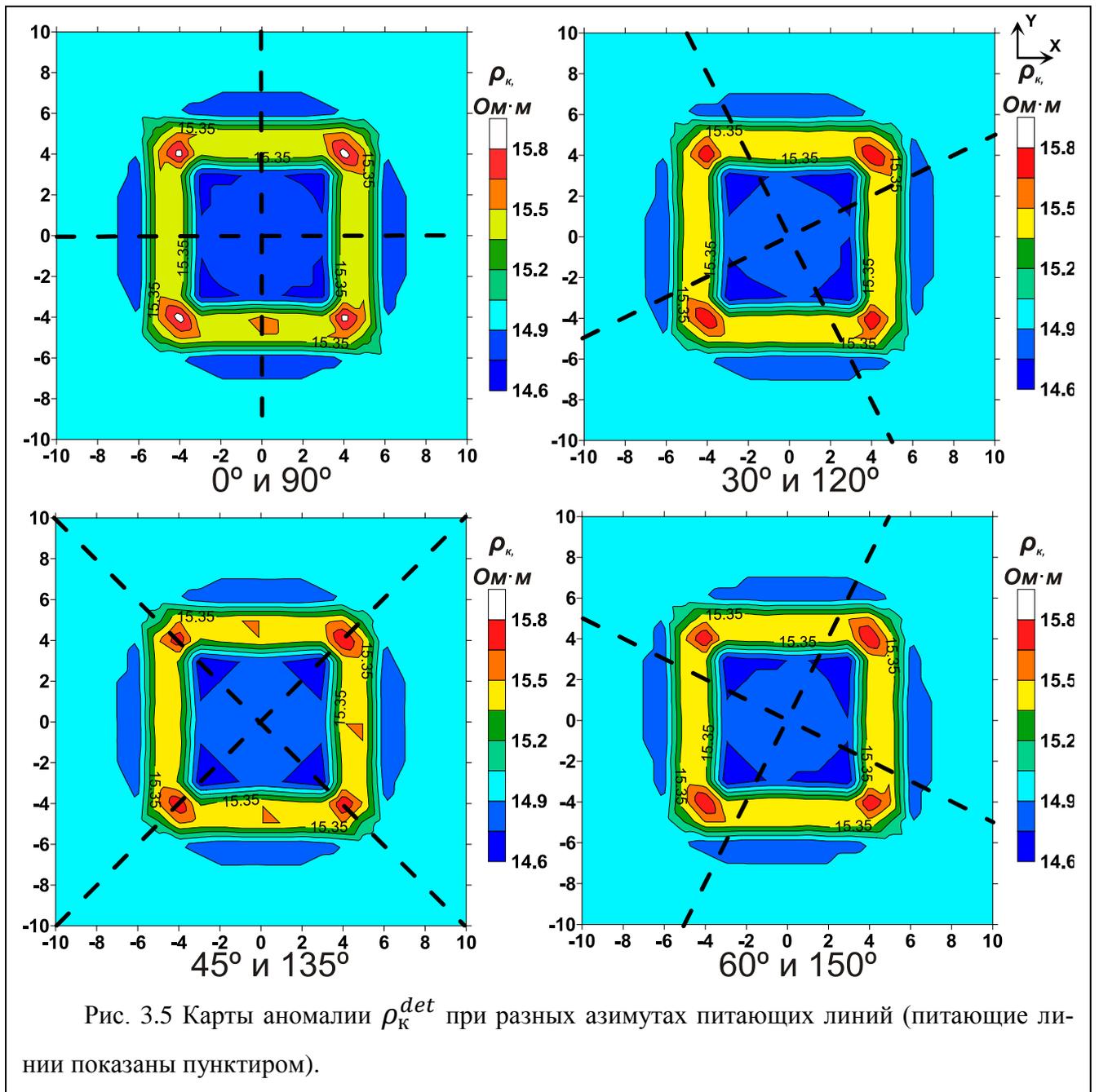
Результаты моделирования

При помощи моделирования была найдена зависимость распределения сопротивлений от угла питающей линии (Рис. 3.4). По результатам моделирования видно, что при разных направлениях питающей линии одно и то же тело создает совершенно разные аномалии, и каждое направление «подсвечивает» определенные элементы объекта. Именно по этой причине целесообразно использовать две перпендикулярные питающие линии и рассчитывать пространственные инварианты, чтобы аномалия отображала настоящую геометрию тела.

Среднее геометрическое, или инвариант \det , было вычислено для каждой пары перпендикулярных ориентаций питающих линий: 0° и 90° , 30° и 120° , 45° и 135° , 60° и 150° (Рис. 3.5).



Раньше всегда старались учитывать априорные данные о строении среды, в которой проводятся исследования, и при полевых работах ЭП-СГ старались располагать две питающие линии так, чтобы хотя бы одна из них была перпендикулярна предполагаемому направлению вкrest линейного объекта. Однако из Рис. 3.5 видно, что для любого азимута полученная аномалия достаточно точно и полно отображает геометрию объекта и с изменением азимута меняется очень незначительно, в пределах погрешности. Поэтому в дальнейшем при выборе ориентации профилей на планшете, покрывающем интересующую площадь, можно руководствоваться другими соображениями. Например, выбрать планшет так, чтобы он совпадал с планшетом каких-либо других методов, для удобства сравнения результатов.



Использование среднего геометрического вместо инварианта ρ_K^{det} позволяет в два раза сократить количество измерений – в два раза увеличить производительность. И поэтому важно оценить вклад побочной компоненты, чтобы понять, насколько при такой замене страдает точность результатов.

На основе моделирования ранее рассчитывались точные значения инвариантов, учитывающие обе компоненты для каждого положения питающей линии. Теперь для удобства можно разделить полный тензор кажущегося сопротивления в зависимости от положения питающей линии: для ориентации вдоль X две компоненты ρ_K^{xx} и ρ_K^{xy} , для ориентации Y – ρ_K^{yx} и ρ_K^{yy} . Тогда для каждого положения АВ кажущееся сопротивление можно представить, как двумер-

ный вектор, а кажущееся сопротивление для каждого положения АВ будет выражаться через свои компоненты так:

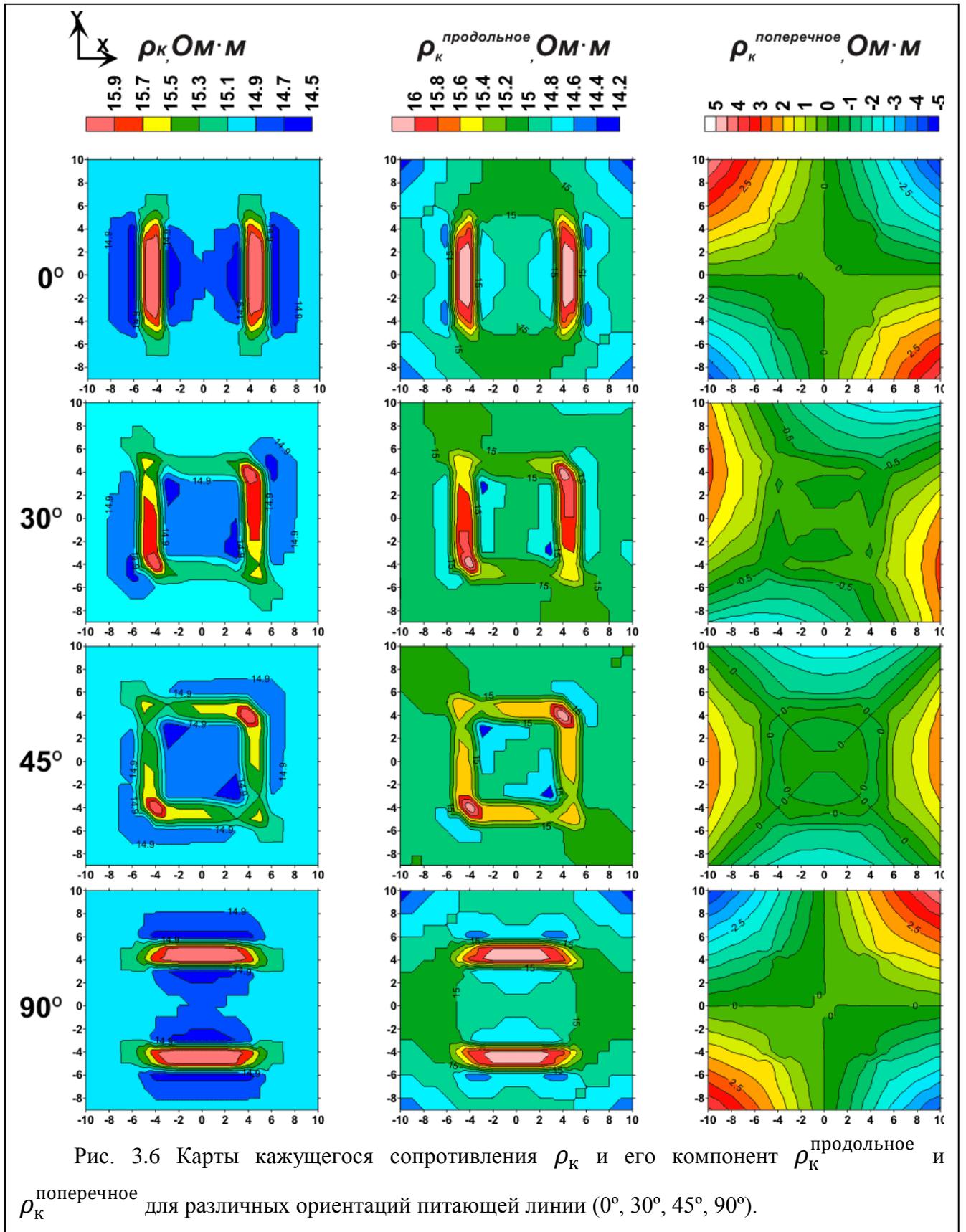
$$\rho_k = \sqrt{(\rho_k^{\text{продольное}})^2 + (\rho_k^{\text{поперечное}})^2} \quad 3.15$$

где индекс обозначает, как расположена приемная линия относительно питающей.

Если проводить аналогию с обозначениями в тензорной методике, то $\rho_k^{\text{продольное}}$ – это ρ_k^{xx} для угла 0° между питающей и приемной линиями или ρ_k^{yy} для 90° , а $\rho_k^{\text{поперечное}}$ – это ρ_k^{xy} для 0° или ρ_k^{yx} для 90° . Два полных кажущихся сопротивления (для разных АВ) используется при подсчете полного инварианта ρ_k^{det} , а для подсчета среднего геометрического (упрощенного инварианта $\rho_k^{\text{det ann}}$) – только 2 главные компоненты $\rho_k^{\text{продольное}}$.

На следующем изображении показаны результаты моделирования с разделенными компонентами сопротивления (Рис. 3.6). В каждой строке изображены слева направо полное сопротивление ρ_k , его главная компонента $\rho_k^{\text{продольное}}$ и второстепенная (побочная) компонента $\rho_k^{\text{поперечное}}$, а сверху вниз каждая карта располагается в соответствии с ориентацией питающей линии относительно объекта и заданной системы координат. Отрицательные значения на картах побочных компонент появляются за счет выбора системы координат.

Качественное сравнение этих рисунков показывает, что аномалия главной продольной компоненты с достаточной точностью повторяет аномалию полного кажущегося сопротивления, а на карте побочной компоненты форма аномального объекта не читается. Кроме этого, если на выбранном планшете, основываясь на отраженной в формуле 3.15 зависимости, рассчитать максимальный вклад побочной поперечной компоненты в полное сопротивление ρ_k , то он, в среднем для планшета составляет менее 1%, при том что максимальное значение достигает 11% и только в угловых или краевых точках планшета. Этим вкладом можно пренебречь без потери точности, поскольку он не сильно искажает целевую центральную аномалию. Во-первых, потому что больший интерес при работах методом СГ представляют высококонтрастные по сравнению с вмещающей средой объекты с неизменной формой. Во-вторых, потому что эти максимальные значения находятся вне зоны расположения объекта, а в центральной части планшета над самим объектом этот вклад еще меньше – он близок к 0, как видно из рисунка (Рис. 3.6).



4. Использование теории пространственных инвариантов при обработке данных ЭП-СГ, полученных рядом с с. Бородино

В качестве иллюстрации эффективности обработки данных метода СГ с использованием инвариантов я привожу результаты электроразведочных работ, проведенных на планшете рядом с с. Бородино для картирования археологических объектов. Так как при обработке данных, полученных рядом с с. Бородино, с самого начала предполагалось использование инвариантов, то работы методом ЭП-СГ на каждой площади проводились поочередно в двух перпендикулярно расположенных друг к другу направлениях питающей линии.

Параметры съемки на участке «Семеновское»: размеры планшета 62м x 70м, сеть наблюдений 1м x 1м, всего 4473 точки.

Различие в показаниях разных приборов и возможное сползание характеристик приборов во времени (методические помехи) учитывалось путем подсчета среднего значения кажущегося сопротивления по профилю и ввода в данные каждого профиля поправки за отклонение от среднего уровня по всему участку. Эта процедура выполнялась для для каждого положения питающей линии. После рассчитывался инвариант ρ_k^{det} .

Для участка «Семеновское» приведены карты кажущегося сопротивления ρ_k^{xx} и ρ_k^{yy} до методической коррекции и вычисления инварианта (Рис. 3.7).

При сравнении двух карт сопротивления ρ_k^{xx} и ρ_k^{yy} между собой отчетливо видно, как протяженные линейные объекты различной ориентации проявляются при смене ориентации питающей линии на перпендикулярную. Кроме того, сравнение этих карт с результирующей картой, построенной после осреднения и вычисления инварианта, иллюстрируют эффективность выбранного способа обработки: и вычисления инварианта, и процедуры осреднения для методической коррекции. Карта ρ_k^{det} после обработки для участка «Семеновское» приведена ниже на Рис. 3.8.

Карта, полученная после обработки, позволила выделить большое количество, как линейных, так и изометричных аномальных зон. На карте есть две аномалии, похожие на дуги концентрических окружностей, и ряд практически прямолинейных аномалий, пересекающих эти две дуги под прямым углом. Помимо этого встречаются крупные изометричные аномальные зоны, которые или являются частью линейной системы дуг и линий, или расположены локально и опосредованно. Система высокоомных аномалий образует замкнутую полигональную структуру с полигонами примерно одинакового размера.

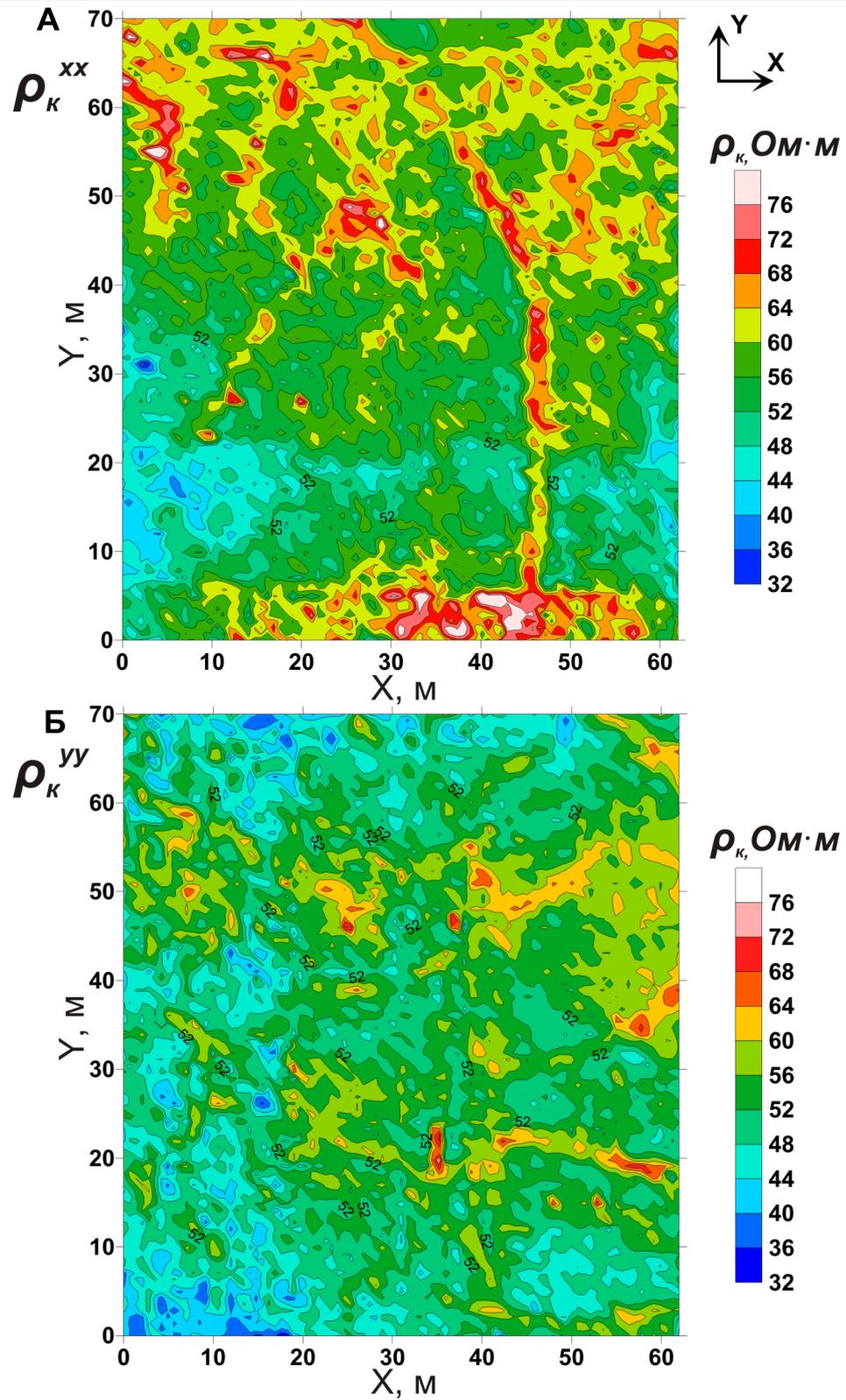
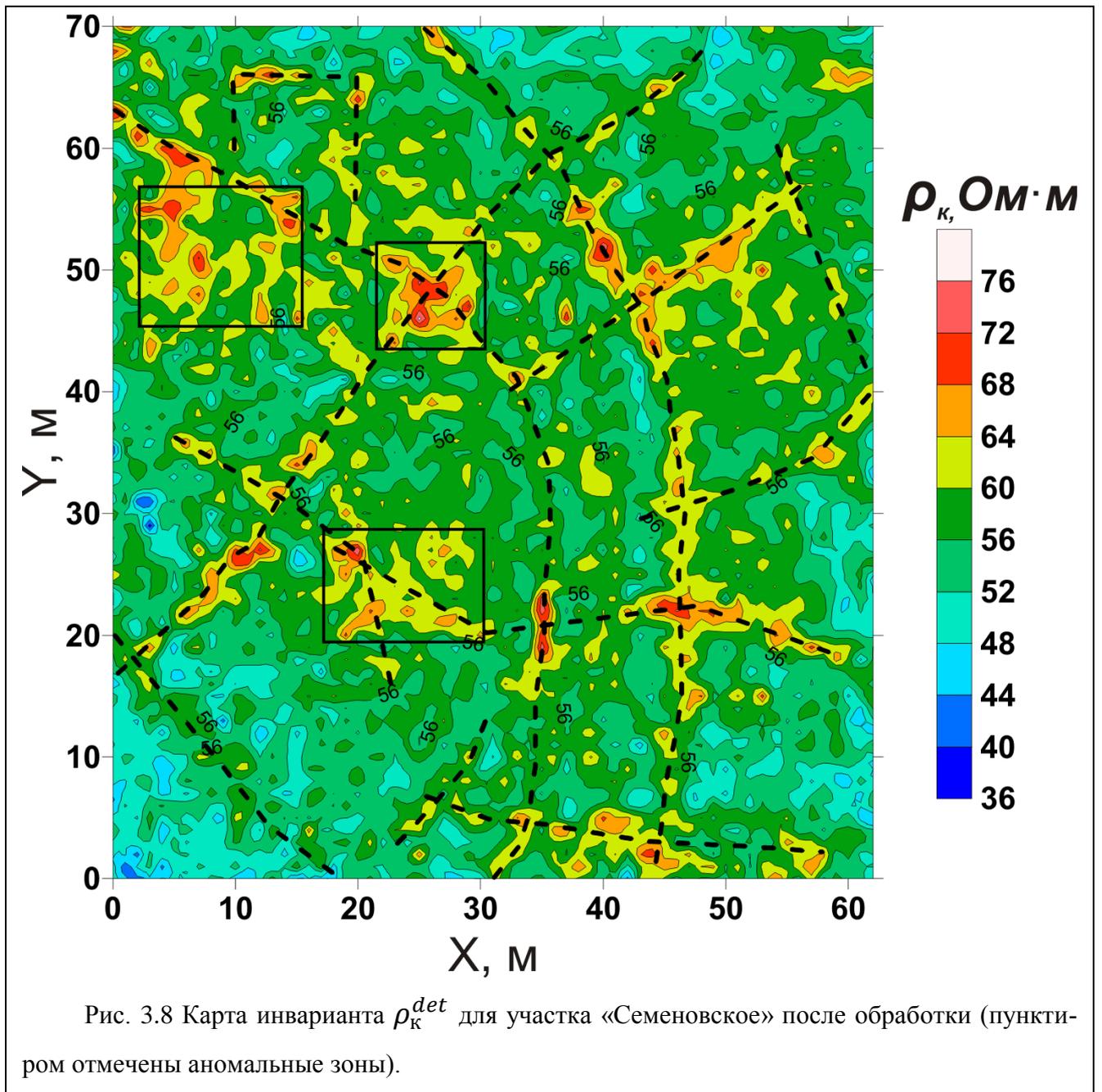


Рис. 3.7 Карты кажущегося сопротивления ρ_k^{xx} и ρ_k^{yy} для участка «Семеновское» до обработки:

А. Ориентация питающей линии параллельно оси X (ρ_k^{xx});

Б. Ориентация питающей линии параллельно оси Y (ρ_k^{yy}).



Первоначальное предположение о связи зон с археологическими объектами не подтвердилось результатами раскопок. При более детальном рассмотрении и анализе комплексных результатов геофизических работ на участках в с. Бородино, а также при совместном анализе аналогичных структур в других регионах России было выяснено, что подобные полигональные структуры являются реликтами криогенного происхождения (Ерохин С.А. и др., 2011). Их проявление в результатах геоэлектрических методов связано с локальным изменением свойств грунтов верхней части разреза в результате их сезонного промерзания и оттаивания, вероятнее всего, в период последнего четвертичного оледенения (12.8-11.5 тыс.лет назад).

5. Выводы по Главе

Я постаралась подытожить результаты своей работы и сделать ряд важных выводов:

1. Использование инвариантов позволяет не только отражать реальную геометрию аномальных объектов на картах, но и находить аномалии, которые до их вычисления выделить было сложно.

2. Традиционная методика, давно использовавшаяся при съемке ЭП-СГ, лучше опробованной венгерскими геофизиками тензорной:

- 1) побочные компоненты вносят очень небольшой вклад, которым можно пренебречь, поэтому традиционная методика и тензорная методика дают после обработки практически идентичные результаты, отличающиеся в пределах погрешности измерений;
- 2) тензорная методика трудоемка и требует больших временных затрат, так как предполагает в 2 раза большее количество измерений и обработки, однако это в настоящее время не оправдано, так как она не дает ощутимого выигрыша в точности или детальности.

3. На основе результатов численного моделирования:

- 1) подтверждена зависимость поляризации линейно протяженных аномальных объектов и описано изменение аномалии от азимута питающей линии;
- 2) доказано, что при расчете инвариантов амплитуда и форма аномалии не зависят от ориентации двух перпендикулярных питающих линий относительно простирания объекта.

4. Получены карты кажущегося сопротивления для объекта Бородино (планшет на участке «Семеновское»), отражающие геометрию возмущающих объектов. Полигональная система, образованная совокупностью этих аномалий, является реликтовой криогенной палеоструктурой, связанной с процессами сезонного промерзания и оттаивания в период последнего четвертичного оледенения (12.8-11.5 тыс.лет назад) (Ерохин С.А. и др., 2011).

Глава 4. Псевдо-3D-электротомография

1. Методики изучения 3D-сред на основе электротомографии

Развитие электроразведочных методов для изучения 3D-сред ускорилось за последние несколько лет (см. Главу 1). Этому особенно способствовало увеличение количества исследований, где их применение оправдано необходимой высокой детальностью измерений и трехмерным строением изучаемой среды.

Традиционная профильная 2D-электротомография является наиболее эффективной технологией в методе сопротивлений, использующейся при детальном исследовании двумерно-неоднородных сред. Но в последнее время возрос интерес к изучению 3D-объектов, и стали интенсивно развиваться многоэлектродные многоканальные аппаратные системы и алгоритмы 3D-инверсии. Это повлекло за собой, в свою очередь, развитие различных методик сбора и обработки данных для изучения непосредственно трехмерно-неоднородных сред. Специфику каждой такой методики определяет различие между пространственными подходами к исследованию среды (их соответствующая классификация более подробно описана в Главе 1 настоящей диссертации):

Площадная 2D-электротомография – это профильная съемка по 2D-профилям с 2D-инверсией по каждому и последующим интерполяционным объединением результатов.

3D-электротомография – многокомпонентные площадные 3D-измерения сигнала на приемных линиях разного азимута для разных положений питающего электрода и 3D-инверсия.

Псевдо-3D-электротомография подразумевает профильную съемку по 2D-профилям и последующую 3D-инверсию всего объема данных.

Площадная 2D-электротомография

Площадная 2D-съемка, строго говоря, не имеет математического и физического обоснования для изучения трехмерных сред. Этот подход возможен только в случае, если требуемая точность и детальность исследований допускает для каждого профиля аппроксимативное двумерное приближение среды. Поэтому мои научные исследования были направлены преимущественно на развитие в рамках второго и третьего подходов (3D-съемка и псевдо-3D-съемка). Тем не менее, во многих случаях предпочтение в исследованиях отдают именно 2D-съемке, так как она обладает рядом неоспоримых преимуществ перед другими двумя подходами:

- метод 2D-электротомографии развивается давно, поэтому алгоритмы, аппаратура и методики уже разработаны для получения оптимального результата при решении широкого круга задач;

- независимость профилей друг от друга позволяет выбирать произвольную сеть наблюдений;
- объемы работ можно корректировать за счет количества профилей и параметров сети наблюдений, в общем случае, это делает площадную 2D-съемку сравнительно более дешевой и производительной.

3D-электротомография

Что касается 3D-электротомографии, она имеет самую высокую степень информативности при изучении трехмерных объектов. Но в то же время она обладает рядом существенных недостатков, и основным является трудновыполнимость. Такие исследования чаще всего подразумевают: во-первых, площадные исследования на участках, размеры которых могут варьироваться в больших пределах, во-вторых, высокое разрешение по горизонтали и, в-третьих, наличие эффекта зондирования по глубине также с высоким разрешением. Для этого, очевидно, требуется большое количество наблюдений и положений электродов, а одновременная коммутация очень большого числа электродов является непростой аппаратно-методической задачей.

Значительно упрощает решение этой задачи использование специализированной аппаратуры для 3D-измерений при проведении работ. Основными недостатками является высокая стоимость такой аппаратуры и относительно низкая рентабельность ее использования в настоящее время: существует очень небольшой круг задач, для решения которых 3D-измерения были бы экономически оправданы и выгодны в сравнении с другими методами электроразведки. К тому же довольно часто просто нет возможности использовать 3D-аппаратуру из-за неимения оной.

В то же время при 3D-исследованиях на площади можно успешно использовать более простую, доступную и распространенную (и поэтому более проверенную и надежную) аппаратуру для обычной 2D-электротомографии. Однако именно в этом случае возникают проблемы с коммутацией, поскольку эта аппаратура способна одновременно коммутировать чаще всего определенное для каждого аппаратного комплекса и четко фиксированное число электродов. При профильной 2D-электротомографии электроды располагаются с равномерным шагом по профилю, и соотношение между их общим количеством и шагом дает возможность добиться оптимального соотношения между глубиной исследования, его разрешающей способностью и детальностью. Но при 3D-электротомографии то же число электродов необходимо расположить уже на площади, что неминуемо приведет к ограничению либо глубинности, либо детальности, либо того и другого вместе. Кроме того, чтобы покрыть хоть сколько-нибудь значимый участок, его придется разбить на элементарные площадки, размеры и форма которых определяются конфигурацией площадной группы электродов, ограниченной аппаратными возможностями.

Таким образом, разрешение, размеры участка и глубинность при 3D-исследованиях взаимосвязаны и целиком определяются линейными размерами этой площадной группы: числом электродов, шагом между ними и количеством уникальных положений группы. Помимо существенных площадных и глубинных ограничений, значительно возрастает и стоимость таких исследований. Стоимость измерения на одной группе равна стоимости одной раскладки профильной 2D-электротомографии, а общая стоимость измерений на площади суммарно соответствует количеству раскладок группы. То есть стоимость исследований на небольшой площади методом 3D-электротомографии будет такой же, как и при 2D-электротомографии с тем же числом раскладок – длинном профиле. А исследованный объем среды и количество принципиально новой информации о разрезе при 3D-съемке значительно меньше, чем при профильной с тем же числом раскладок.

Мое участие в изучении метода 3D-электротомографии ограничилось обзором достижений в этой области, оценкой основных недостатков методики и формулировкой рекомендаций для ее дальнейшего развития. Оценка недостатков и рекомендации основаны на опыте, полученном при опробовании методики в полевом варианте с электротомографической 2D-аппаратурой и последующей обработки данных с помощью доступных средств (более подробно это описано в магистерской диссертации – Павлова А.М., 2011). Намеченные направления развития: разработка аппаратуры и программного обеспечения для предварительной обработки данных (визуализации, фильтрации), определение оптимальной конфигурации используемых установок, оптимизация алгоритмов и подбор параметров инверсии.

Псевдо-3D- электротомография

Так называемая псевдо-3D-электротомография – это исследования методом 2D-электротомографии по системе профилей, расположенных на площади, с последующей 3D-инверсией всего объема данных. Система наблюдений чаще, хотя и не всегда, содержит набор параллельных 2D-профилей, в этом случае она более производительна и проста в привязке и обладает равномерной горизонтальной разрешающей способностью и детальностью.

Методика наблюдений псевдо-3D является хорошей альтернативой 3D-электротомографии. Такая съемка, во-первых, направлена на получение результата в рамках трехмерной модели среды и, во-вторых, позволяет в большой мере преодолеть обозначенные выше пространственные и аппаратурные ограничения, свойственные 3D-исследованиям, за счет возможности использования существующей аппаратуры для 2D-электротомографии: исследования по методике псевдо-3D-электротомографии с 2D-аппаратурой, очевидно, намного проще реализовать.

Благодаря своей относительной простоте и способности достаточно точно решать поставленную задачу, методика псевдо-3D-электротомографии – один из лидеров по количеству исследований трехмерных объектов. Она является самым распространенным и активно развивающимся направлением в изучении неоднородных 3D-сред со сложной конфигурацией неоднородностей. К настоящему моменту сформулированы рекомендации к осуществлению наблюдений и обработки в рамках методики, доказана ее эффективность для изучения ряда приближенных моделей.

2. Цели и задачи исследования

Важным и интересным является вопрос о преимуществах и недостатках псевдо-3D-методики в сравнении с площадными и даже обычными профильными 2D-исследованиями, поскольку последние, очевидно, обладают лучше изученной теоретической базой и в большинстве случаев более рентабельны и производительны. Кроме того, для дальнейшего развития методики псевдо-3D-измерений необходимо определить условия ее применимости, выявить ее преимущества перед 2D-электротомографией, а также разграничить круг решаемых ими задач. Различия между методиками, в основном, касаются строения результирующей модели, детальности, контрастности, проявленности артефактов инверсии, степени их подавления и т.д. Оценке этих характеристик, базирующейся на сравнительном анализе, как модельных, так и полевых результатов для обоих подходов, я уделяла особое внимание в данной Главе диссертации.

Задачи исследования:

1. Показать возможность применения псевдо-3D-съемки с традиционной 2D-аппаратурой для построения трехмерной геоэлектрической модели среды;
2. Показать принципиальную возможность построения трехмерной объемной геолого-геофизической модели среды на основе данных псевдо-3D-электротомографии;
3. Оценить производительность методики сбора данных в зависимости от топографических, погодных и других условий для одного участка работ, предложить пути ее увеличения;
4. Построить и структурировать последовательный граф обработки данных (имеющиеся сейчас средствами): от расчета, визуализации и анализа кажущегося сопротивления до получения и визуализации геолого-геофизической модели;
5. Оценить производительность обработки данных для одного участка работ, предложить комплексные решения по оптимизации обработки и минимизации временных затрат;
6. Оценить условия применимости методики псевдо-3D-электротомографии и определить круг задач, для решения которых целесообразно ее использовать.

В общем случае в трехмерных средах существует зависимость кажущегося сопротивления в каждой точке измерений от направления поляризации окружающей среды, создаваемая различным влиянием неоднородностей в области изучения. В Главе 3 было показано и подтверждено, что для данных метода СГ геометрии аномального объекта и направление тока в питающей линии значительно влияют на значения кажущегося сопротивления – степень проявленности аномального объекта на фоне вмещающего разреза. И линейно протяженный объект наиболее чувствителен к перпендикулярному распространению тока и практически нечувствителен к продольному. Это означает, что чем больше горизонтальный угол поворота оси линий наблюдения (и установок) относительно главной оси линейно вытянутого аномального объекта, тем меньший эффект создает этот объект в измеренном поле. При работах методом СГ в условиях параллельности этих осей объект практически не проявляется, но при работах методом электротомографии за счет многочисленных положений питающих электродов, особенно на нескольких профилях, этот эффект удается в некоторой степени преодолеть, но, по всей видимости, не до конца, хотя до настоящего времени этот вопрос подробно не изучался.

Вместе с тем методе псевдо-3D-электротомографии часто используется система параллельных профилей (пример – один цвет на Рис. 4.2 и Рис. 4.11). Геометрически такая система наблюдений схожа с используемой в методе СГ. Основное отличие – много положений питающих электродов на каждой линии профиля. Однако метод СГ предназначен только для картирования объектов, а метод электротомографии – в том числе и для наиболее точной оценки распределения сопротивлений в среде. В псевдо-3D-наблюдениях шаг между профилями обычно в 2-4 раза больше, чем шаг по профилю между электродами. Поэтому возможны случаи, когда аномальный (в том числе линейный) объект располагается не на линии какого-либо профиля, а между профилями на некотором расстоянии от каждого из них. Если кроме этого, проявляются обозначенные в предыдущем абзаце особенности поляризации линейных объектов, тогда достоверность определения положения границ объекта, глубины залегания и свойств существенно снижается.

На основании этих соображений возникла идея использовать так же, как и в методе СГ, несколько различных азимутов поляризации для повышения точности результатов псевдо-3D-съемки при исследовании трехмерно неоднородных сред. Для этого было предложено выбрать два перпендикулярных направления профилей в площадной системе наблюдений (Рис. 4.2, Рис. 4.11). Подобный расширенный способ измерений связан с несколькими дополнительными более узконаправленными задачами:

1. Выявить, в общем случае, наличие зависимости кажущегося сопротивления от азимута профилей путем сравнения результирующих геоэлектрических моделей при одинаковой обработке данных;

2. Сравнить геоэлектрическую модель, учитывающую данные обоих азимутов поляризации, с геоэлектрическими моделями, полученными для каждого азимута отдельно;
3. Выяснить, имеет ли преимущество выполнение съемки с двумя азимутами по сравнению с одним с точки зрения точности и производительности при увеличении шага между профилями;
4. Оценить условия применимости и определить круг задач для методики псевдо-3D-электротомографии с двумя азимутами профилей.

Исследования базировались на нескольких полевых экспериментах с разной контрастностью и конфигурацией неоднородностей, топографией и решаемыми задачами, и на модельных результатах, полученных над трехмерными моделями среды с включением линейных объектов разной ориентации.

3. Методика псевдо-3D-электротомографии

Принципиально методика полевых работ псевдо-3D-электротомографии – это съемка по сети двумерных профилей электротомографии. И, поскольку измерения проводятся с помощью 2D-аппаратуры, процесс измерения отдельно на каждом профиле совершенно не отличается от принятого при работах методом 2D-электротомографии.

Я буду иметь дело с методикой, предполагающей съемку по параллельным двумерным профилям, поскольку она имеет ряд существенных преимуществ перед любой другой съемкой по произвольной сети профилей.

Во-первых, она наиболее корректна с точки зрения равномерной детальности по горизонтали. Если шаг по профилю и шаг между профилями являются постоянными величинами, то сеть наблюдений (то есть густота съемки и ее детальность) равномерна по каждой горизонтальной оси отдельно, а при их совпадении – одновременно по обеим осям.

Во-вторых, она не требует дополнительной обработки перед инверсией. Большинство программ, приспособленных для расчета обратной задачи, построены на основе методов конечных разностей (МКР) или конечных элементов (МКЭ). И те, и другие предполагают равномерную сеть при разбиении ячеек модели по обеим горизонтальным осям. При съемке по параллельным профилям это достигается автоматически благодаря равномерной сети наблюдений. А при неравномерной перед инверсией необходим дополнительный шаг, на котором проводится интерполяция значений на равномерную сеть.

В-третьих, съемка по параллельным профилям более проста в реализации на практике. Понятными являются направления обеих горизонтальных осей – вдоль и поперек профилей, понятна форма участка работ – квадрат. Это в значительной степени облегчает разбивку и при-

вязку измерений. Кроме того, при крупномасштабных исследованиях несложно осуществлять перенос с одного профиля на другой.

При использовании 2D-аппаратуры выбор параметров съемки на каждом профиле основывается на общих рекомендациях, характерных для обычной 2D-электротомографии (шаг между электродами по профилю выбирается исходя из требуемой детальности работ; необходимо проводить топографическую съемку по профилю с той же детальностью, что и электроразведочную; выбор электроразведочных установок и их параметров производится в зависимости от поставленной задачи и условий проведения работ и т.п.). Но кроме этого, в сравнении с обычной 2D-электротомографией методика съемки псевдо-3D электротомографии характеризуется следующими особенностями:

1. Шаг между профилями не должен превышать 4 шага по профилю (желательно равен шагу по профилю, чаще всего – 2 шага по профилю). В противном случае некорректным представляется использование 3D инверсии – измерения на соседних профилях физически оказываются мало связанными друг с другом, так как не происходит исследования одного объема среды с разных профилей.

2. На практике размеры единичного планшета определяются шагом между электродами и количеством электродов в одной раскладке (на одном профиле). В случае необходимости исследовать участок большего размера, чем размер единичного планшета, при псевдо-3D-съемке, особенно в двух поляризациях, наращивание планшета оказывается очень трудоемким.

3. Расположение электродов определяется не по расстоянию вдоль косы, как наиболее правильно делать при 2D-съемке, а по горизонтальному проложению. Иначе оказывается невозможным проводить подбор геоэлектрической модели с равномерным (по крайней мере, закономерным) разбиением на ячейки. Это приводит к необходимости проводить разбивку сети наблюдений, привязку и топографическую съемку инструментальными геодезическими методами. В связи с этим можно отметить, что в целом возрастают требования к топографическому обеспечению работ, как для высотной, так и для плановой привязки точек наблюдения.

4. Измерения проводятся по единому для каждого профиля протоколу. Это необходимо для обеспечения равномерности горизонтальной чувствительности и разрешающей способности в рамках исследуемого планшета.

Все перечисленные выше пункты были учтены мной при планировании модельных и полевых экспериментов.

4. Расчет эффектов от трехмерного объекта при псевдо-3D-электротомографии с помощью математического моделирования методом МИУ

Моделирование было призвано оценить применимость и разрешающую способность методики для разных моделей на основе численных расчетов.

В разных работах, упоминаемых в обзоре (см. Главу 1), уже были многократно описаны преимущества трехмерной методики измерений (ЭТ по сети параллельных профилей) перед двумерной методикой измерений (ЭТ по одиночному профилю) при исследованиях локальных трехмерных объектов разной глубины залегания и контраста. В своей работе я подняла вопрос о зависимости проявления объектов от относительной ориентации профилей. Для локальных изометричных объектов она, очевидно, не важна, поэтому далее речь пойдет только о моделях линейных объектов. В рамках этой Главы я проводила математическое моделирование для моделей одиночных линейных объектов и объектов со сложной геометрической конфигурацией – совокупности линейных объектов различной ориентации.

Параметры моделирования

Математическое моделирование осуществлялось в программе IE3R1 (Инструкция к программе IE3R1, 1991), упомянутой и более подробно описанной в предыдущих Главах.

Принципиальная конфигурация моделей такая же, какая была у использованных при моделировании в Главе 2 по методу ЭП-СГ. Первая модель «Стена-Ров» (аналог модели «Стена») – один линейно вытянутый аномальный объект, а вторая модель «Стены-Рвы» (аналог модели «Стены») – 4 линейных объекта, образующие квадрат (Рис. 4.1).

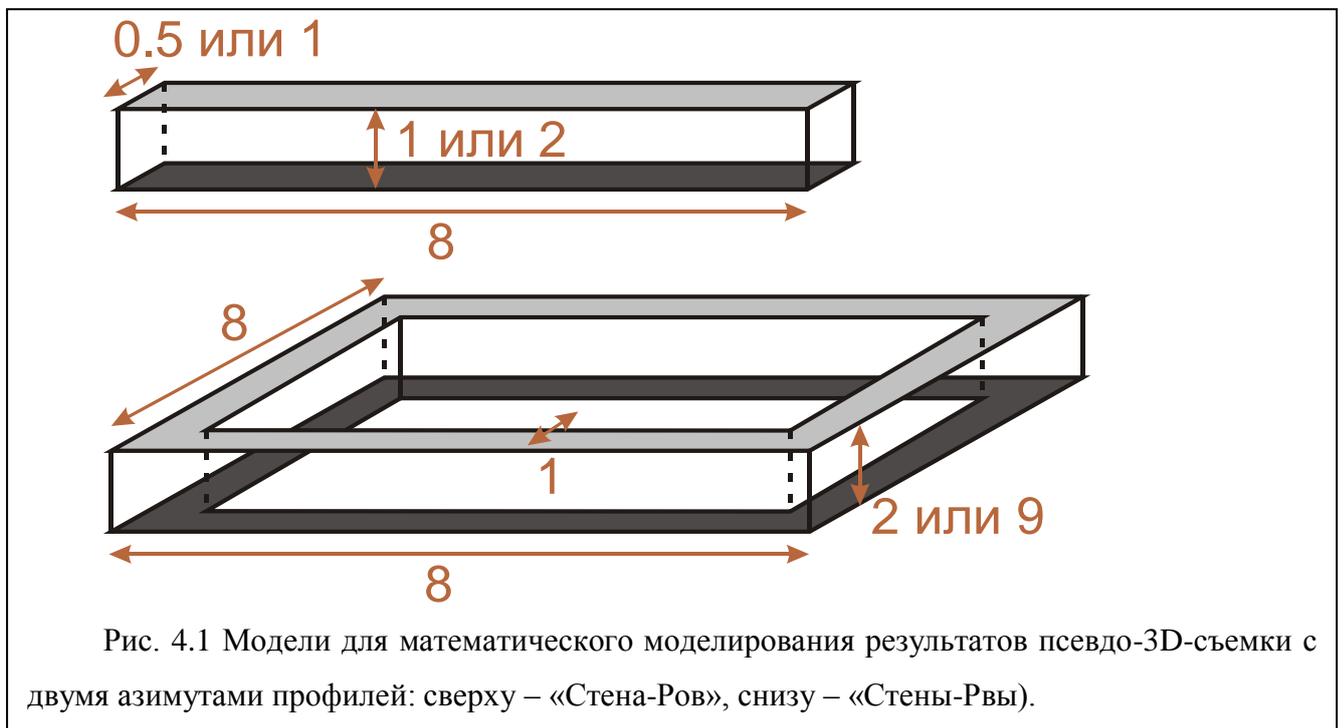
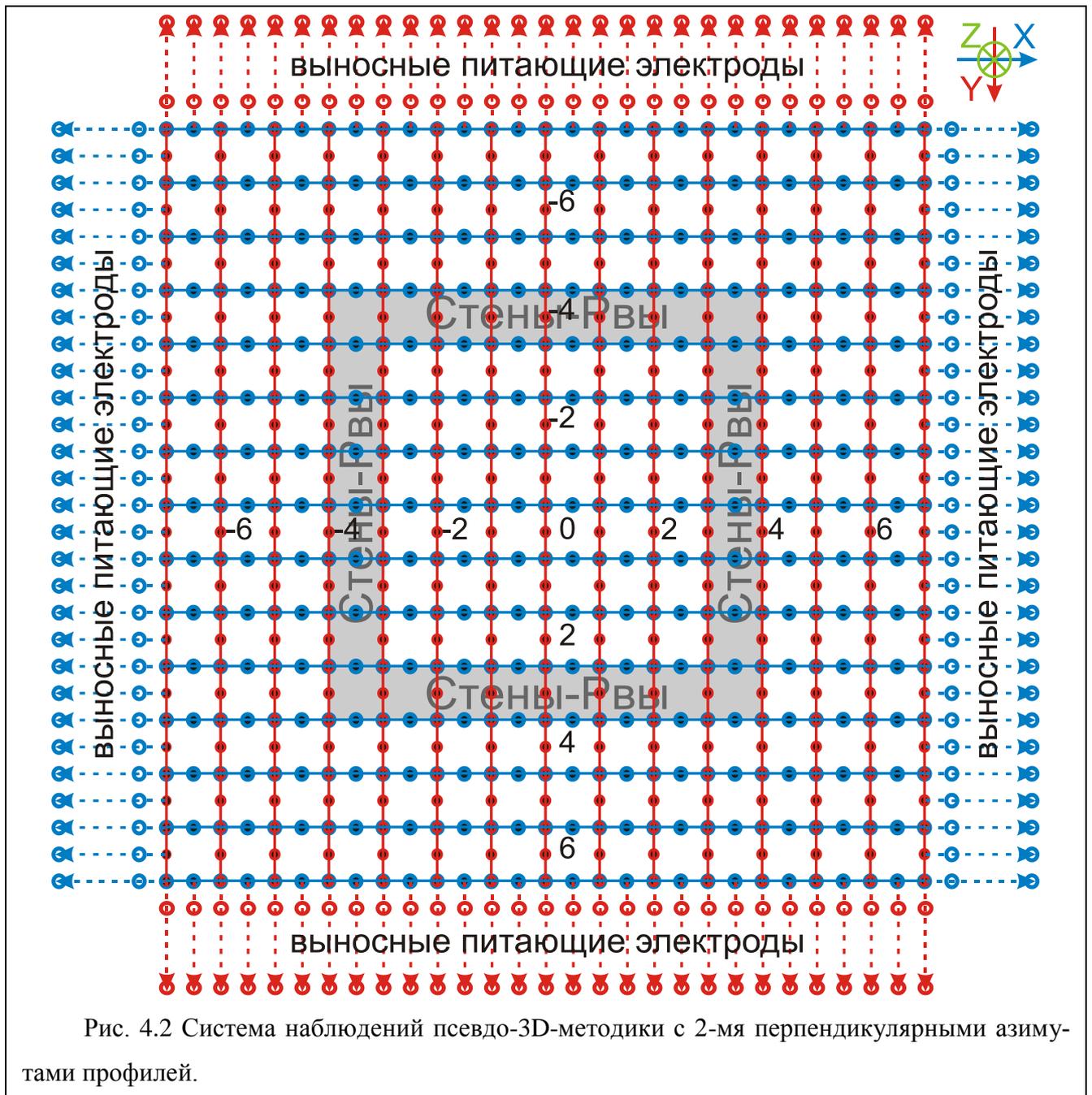


Рис. 4.1 Модели для математического моделирования результатов псевдо-3D-съемки с двумя азимутами профилей: сверху – «Стена-Ров», снизу – «Стены-Рвы».

Сеть наблюдений при моделировании включала в себя два набора параллельных профилей с перпендикулярными азимутами (Рис. 4.2). В каждом наборе было 15 двумерных профилей длиной по 15 м каждый. Математический расчет поля над объектом имитировал съемку методом электротомографии отдельно по одному 2D-профилю, каждый из которых являлся частью общей системы наблюдений, затем все результаты объединялись в общий массив площадных данных. Шаг по профилю выбран 0.5 м, между профилями – 1 м. Симуляция измерений проходила с использованием трехэлектродной комбинированной установкой Шлюмберже $Amn+mnB$. Для каждой точки участвовали записи все возможные разности АО (минимальный разнос $AO=0.75$ м, максимальный разнос $AO=13.75$ м) при неизменяемых размерах приемной линии $MN=0.5$ м. В качестве точки записи принималась середина приемной линии MN .



В рамках модели «Стена-Ров» при одинаковой сети наблюдений варьировались горизонтальные размеры (толщина стены), глубина залегания и контрастность (Табл. 4.1). Результаты характеризуют горизонтальную разрешающую способность, относительную глубинность и чувствительность предложенной методики для линейного объекта при его различной контрастности по отношению к вмещающей среде.

Модель «Стены-Рвы» - это усложненный вариант, совокупность линейных объектов разной ориентации. Здесь расчеты проводились также для различной контрастности, но размеры каждого линейного объекта и глубина верхней кромки уже не изменялись, их оптимальная конфигурация была определена по результатам расчетов первой модели. Зато для этой усложненной модели существенно изменялась глубина нижней кромки, чтобы была возможность анализировать, насколько отличаются результаты псевдо-3D-съемки для объектов приповерхностных и объектов, простирающихся на глубину.

Табл. 4.1 Параметры моделей.								
Модель \ Параметры	Контраст сопротивлений	Сопротивление объекта, Ом·м	Сопротивление вмещающей среды, Ом·м	Глубина верхней кромки, м	Глубина нижней кромки, м	Толщина стен, м	Размеры объекта, м	
«Стена-Ров»	10	300	30	0.5	1.5	0.5	8 x 0.5	
				3	5	1	8 x 1	
	100	3000	30	0.5	1.5	0.5	8 x 0.5	
				3	5	1	8 x 1	
	0.1	30	300	0.5	1.5	0.5	8 x 0.5	
				3	5	1	8 x 1	
	0.01	30	3000	0.5	1.5	0.5	8 x 0.5	
				3	5	1	8 x 1	
	«Стены-Рвы»	10	300	30	1	3	1	8 x 8
					1	10		
100		3000	30	1	3			
				1	10			
0.1		30	300	1	3			
				1	10			
0.01		30	3000	1	3			
				1	10			

Результаты моделирования

Оценку качества результатов и сравнение двумерного и трехмерного подходов к обработке я осуществляла на основе результатов двумерной и трехмерной инверсии данных, полученных при моделировании. Инверсия была проведена с использованием программ Res2DInv и Res3DInv (Loke M., 1996-2009) с единым стандартным набором параметров.

Определение чувствительности на основе результатов моделирования (на примере модели «Стена-Ров») – это исследования методологического характера. На их основе были сделаны выводы о специфических правилах построения сети наблюдений в соответствии с информацией о целевых объектах при реальных исследованиях по методике псевдо-3D:

1. шаг по профилю рекомендуется выбирать как минимум в 2-3 чаще, чем предположительные минимальные размеры изучаемого объекта;
2. шаг между профилями также не должен превышать более чем в 2 раза тот же минимальный размер объекта;
3. при большей контрастности объекта по отношению к вмещающей среде, объект сильнее проявляется в измеренном поле, однако также увеличиваются и искажения на границах; возможно изучение сред с контрастностью от 0.01 до 100 раз.

Также были определены оптимальные параметры усложненной модели «Стены-Рвы» для оценки разрешающей способности, глубинности выбранной методики и относительной контрастности результатов инверсии по сравнению с начальной контрастностью модели.

Исходя из обозначенного выше и поскольку модель «Стены-Рвы» является объединенной совокупностью четырех одиночных моделей «Стена-Ров» различной ориентации, наиболее целесообразно изображать графически только результаты, полученные для модели «Стены-Рвы».

Двумерная инверсия проводилась по каждому отдельному профилю, трехмерная – по совокупности профилей. Для каждой модели было две перпендикулярные системы параллельных профилей, но в силу симметрии модели обе координатные оси равнозначны – измерения по профилям вдоль оси X совпадают с имеющими одноименные координаты измерениями вдоль оси Y. Поэтому трехмерная инверсия проводилась для каждой модели только дважды: по совокупности параллельных профилей только одной ориентации (вдоль оси X) и по совокупности профилей обеих ориентаций (вдоль оси X + вдоль оси Y). В результате было получено две трехмерные геоэлектрические модели, а не три, как было бы в случае, если бы модель с инверсией по профилям вдоль оси Y отличалась от инверсии по профилям вдоль оси X.

Чтобы получить две аналогичные трехмерные геоэлектрические модели из двумерных данных результаты были собраны так же, только после двумерной инверсии: в совокупность профилей только одной ориентации (вдоль оси X) и в совокупность профилей обеих ориента-

ций (вдоль оси X + вдоль оси Y). Далее по каждой интерполяционными методами по единой сети была построена своя трехмерная геоэлектрическая модель. Только в случае двумерной инверсии по двум системам профилей из-за несовпадения координат точек записи после интерполяции проводилось еще и осреднение данных по двум направлениям путем вычисления простого среднего геометрического сопротивления на каждой точке.

Напомню, что помимо учета данных одной или двух систем профилей, основными отличиями моделей друг от друга являлись контраст и глубина нижней кромки. Для удобства модели собраны в таблицы с разным контрастом, а внутри каждой по столбцам и срокам варьируются глубина нижней кромки и количество систем профилей (1 или 2) (Рис. 4.3, Рис. 4.4, Рис. 4.5, Рис. 4.6). Визуальный анализ позволяет сделать несколько важных выводов.

Во-первых, для всех моделей сопротивление вмещающей среды восстанавливается с высокой точностью. Но не для всех моделей угадывается даже первоначальная горизонтальная геометрия аномального объекта «Стены-Рвы». Принципиально наиболее точная форма объекта в плане – квадрат – сохраняется для всех моделей по трехмерной инверсии. Хотя для данных с двумя системами профилей квадрат, наблюдаемый на всех геоэлектрических моделях по 3D-инверсии, симметричен, а для данных с одной системой (профили вытянуты по оси X) нет, но об этом будет сказано ниже. При тех же параметрах на моделях по 2D-инверсии можно наблюдать совершенно разные картины в зависимости от сети наблюдений (одна или две системы профилей), контраста и глубины нижней кромки. Например, для обоих значений контраста 10 и 100 при одной системе профилей при высокоомном включении видна только половина объекта – 2 стены из 4-х, а при двух системах восстанавливается правильная начальная форма объекта – квадрат. А при низкоомном при одной и при двух системах профилей для контраста 0.1 лпять же виден проводящий квадрат, а в случае контраста 0.01 также и при одной и при двух системах вместо проводящих сторон квадрата выделяется равномерная проводящая область прямоугольной (при одной системе профилей) или квадратной (при двух системах профилей) формы, то есть квадрат как бы полностью «заполнен» проводящими отложениями и нет различий между сопротивлением этого «заполнения» и сопротивлением сторон квадрата – стен. Эта геоэлектрическая модель уже принципиально по форме непохожа на заданную при моделировании. Последнее искажение наиболее существенно, вероятно, оно может происходить, потому что алгоритм программы 2D-инверсии не справляется с такой высокой контрастностью модели – 0.01.

Во-вторых, здесь по результатам моделирования можно видеть, как проявляется упомянутый и рассматриваемый в Главе 3 эффект поляризации линейных объектов. Там он изучается в рамках метода ЭП-СГ, где положение питающей линии фиксировано, а здесь в методе двумерной электротомографии и псевдо-3D-электротомографии, где на каждом профиле множество

положений питающих электродов. Несмотря на это, при одной системе профилей в данных двумерной электротомографии (2D-инверсия по каждому профилю), как и в данных метода ЭП-СГ, проявляются только перпендикулярные линейные объекты «Стены-Рвы», продольные полностью отсутствуют в геоэлектрической модели. Описанный эффект хорошо видно при высокоомном включении на Рис. 4.3 и **Ошибка! Источник ссылки не найден.** слева, несколько хуже из-за цветовой шкалы – при проводящем на Рис. 4.5 также слева. На Рис. 4.6 эффект почти не виден из-за сильного искажения модели. На геоэлектрических моделях после 3D-инверсии, как было сказано выше, даже при одной системе профилей четко виден весь квадратный объект (Рис. 4.3, Рис. 4.4, Рис. 4.5, Рис. 4.6 справа), и эффект проявляется в его несимметричности при использовании одной системы профилей. В этом случае наблюдается одна интересная закономерность. При высокоомном включении, так же, как и по 2D-инверсии, лучше проявляются линейные объекты, перпендикулярные профилям (профили располагаются по оси X, а объекты вытянуты вдоль оси Y) (Рис. 4.3, Рис. 4.4), а при проводящем возникает, в отличие от 2D-инверсии, своеобразная инверсия, и лучше проявляются уже объекты, параллельные профилям (профили располагаются по оси X и объекты вытянуты вдоль оси X) (Рис. 4.5, Рис. 4.6).

В-третьих, все модели по 3D-инверсии получаются более контрастными, чем по 2D: разница между сопротивлением, соответствующим вмещающей среде, и сопротивлением объекта (если брать максимум для высокоомного и минимум для проводящего) всегда больше в правом столбце на рисунках. Истинный контраст начальной модели и контраст, получившийся при обработке, показаны в Табл. 4.2.

И в четвертых, при описании геоэлектрических моделей, необходимо обратить внимание на сопряженные аномалии и искажения в областях модели, где отсутствует возмущающий аномальный объект. Они возникают в процессе инверсии как средство минимизации ошибки решения обратной задачи и чаще всего расположены либо в местах наибольшего градиента сопротивлений (компенсация при условии гладкости решения), либо в виде краевых эффектов на границах модели (компенсация из-за низкой плотности данных). Эти искажения тем больше, чем сложнее измеренное поле. В данном случае эта сложность определяется преимущественно контрастностью начальной модели при моделировании. Чем она выше, тем сильнее искажения. Хотя также влияет и сам алгоритм расчета: поскольку 3D-инверсия способна давать более высокую контрастность результата, как было отмечено выше, контраст искажений также оказывается выше, чем при 2D-инверсии.

Табл. 4.2 Контрастность изначально заданных при моделировании моделей и результатов инверсии.						
Параметры	Сеть наблюдений	Нижняя кромка	Контраст начальной модели при моделировании			
			10	100	0.1	0.01
			Контраст геоэлектрической модели			
2D-инверсия	1 система профилей	3 м	2.1	2.5	0.37	0.14
		10 м	2.4	3.1	0.38	0.13
	2 системы профилей	Контраст сопротивлений по инверсии для 2 систем профилей полностью совпадает с контрастом для 1 системы (см. строку выше)				
3D-инверсия	1 система профилей	3 м	3.6	5.2	0.11	0.02
		10 м	4.8	14.4	0.08	0.007
	2 системы профилей	3 м	2.7	3.4	0.15	0.03
		10 м	3.6	6.4	0.11	0.03

На геоэлектрических моделях искажения присутствуют и непосредственно вблизи границ объекта, и по краям. Первые видны лучше на моделях с проводящим включением, частично из-за того, что они в этом случае сильнее, а частично из-за выбора цветовой шкалы. Краевые же искажения особенно ярко проявились на геоэлектрической модели по 3D-инверсии для 2 систем профилей и нижней кромки 10 м (Рис. 4.6 внизу справа) в виде проводящих слоев в основании модели (нижние углы куба). Выявление и картирование целевого объекта «Стены-Рвы» искажения не затрудняют, но могут быть проблемой при реальных исследованиях, если необходимо картировать какие-либо границы в нижней части исследуемой области.

Оценить точность разрешения объекта, контрастность и степень искаженности каждой модели можно также, анализируя гистограммы распределения сопротивлений по результатам инверсии (Рис. 4.7, Рис. 4.8, Рис. 4.9, Рис. 4.10). Они дают возможность сравнивать гладкость и точность решения в каждом случае не только на основе графического анализа. Но стоит отметить, что после построения геоэлектрической модели фактически заканчивается этап автоматической обработки, и следующим шагом является интерпретация данных, при которой одной из наиболее надежных оценок качества является именно осуществляемый интерпретатором визуальный анализ и корреляция результатов с априорной информацией (при ее наличии).

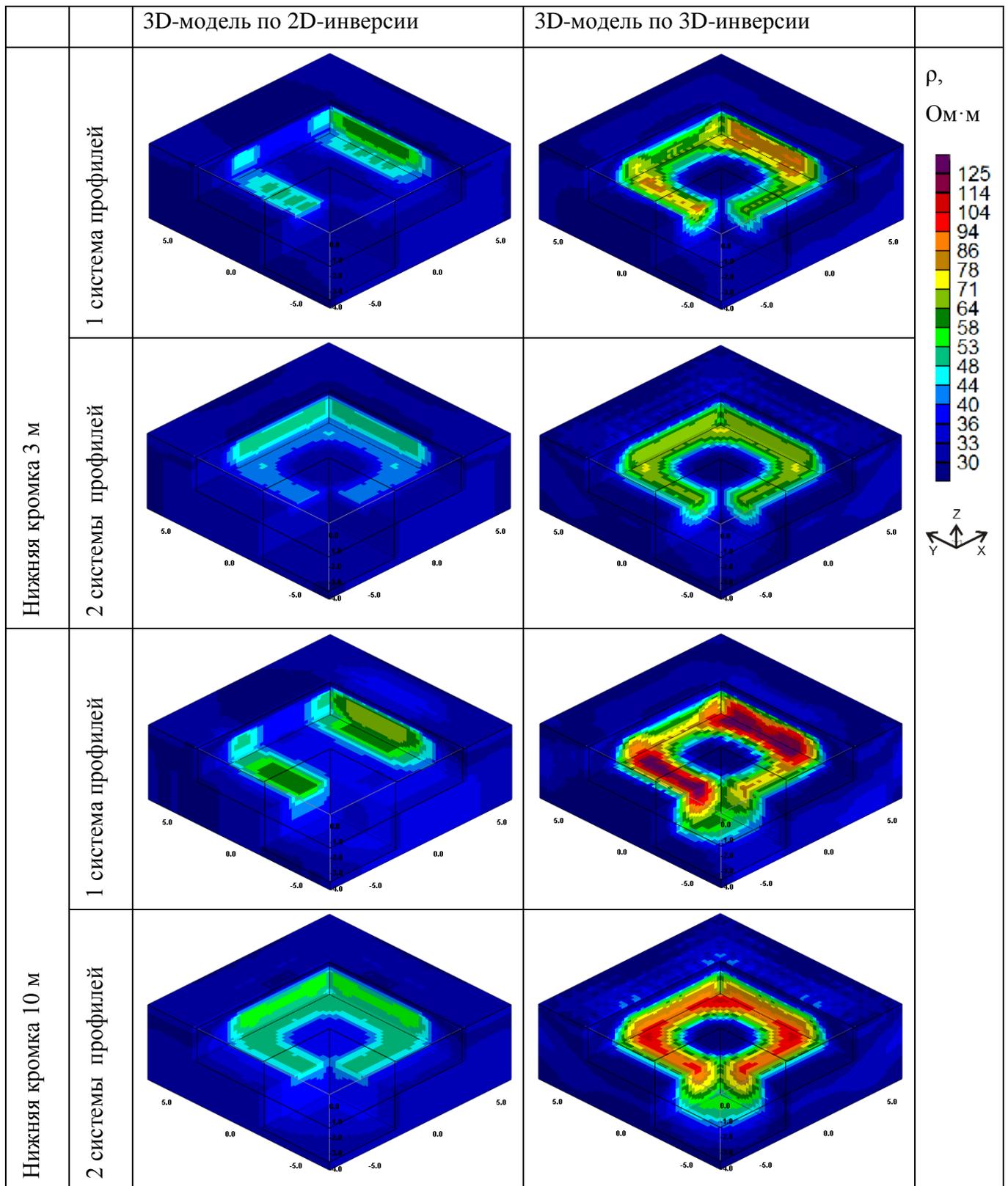


Рис. 4.3 Трехмерные геоэлектрические модели по результатам 2D- и 3D-инверсии данных трехмерного моделирования измерений по методике псевдо-3D-электротомографии над моделью «Стены-Рвы». Контраст 10, вмещающая среда 30 Ом·м, объект 300 Ом·м.

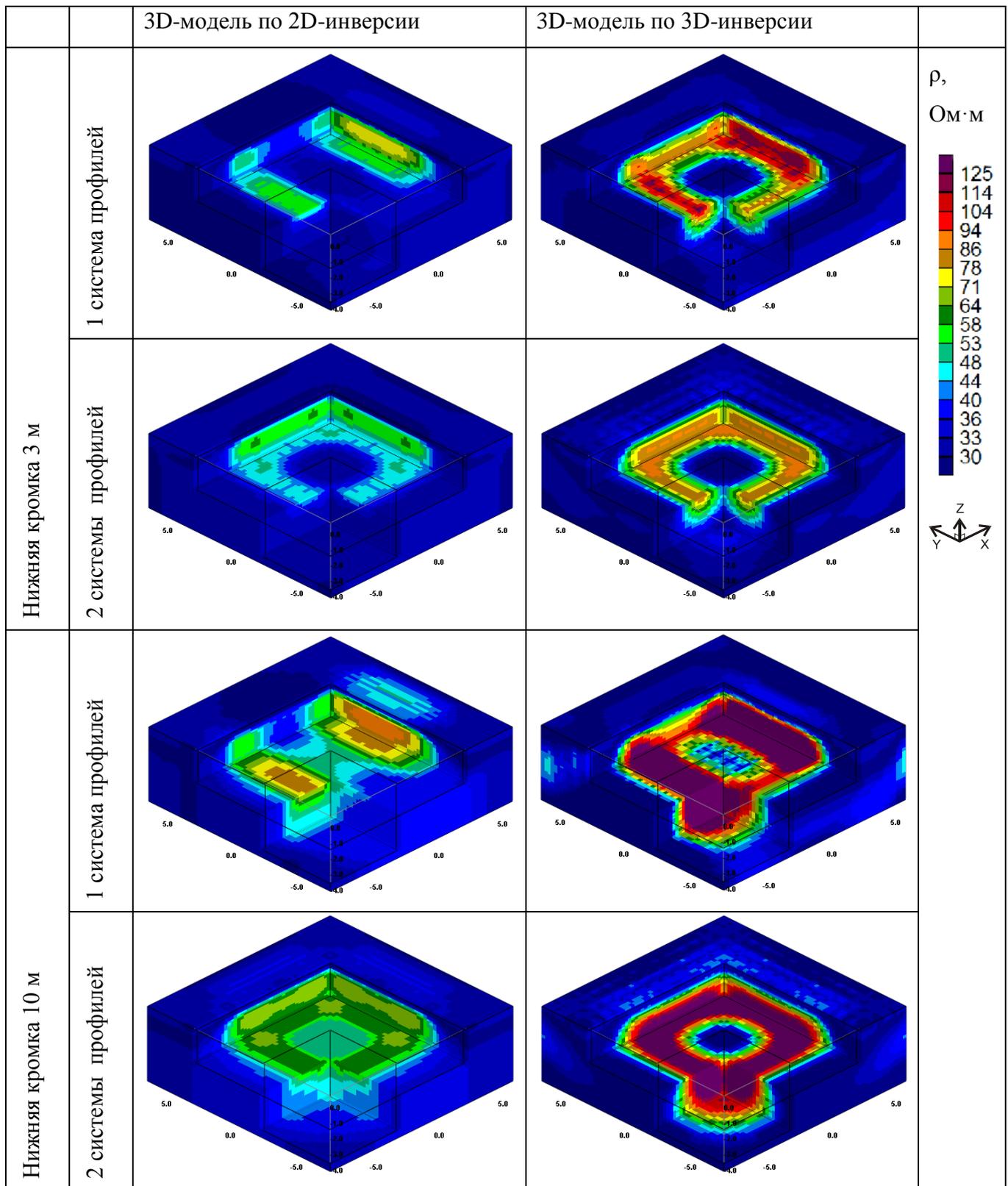


Рис. 4.4 Трехмерные геоэлектрические модели по результатам 2D- и 3D-инверсии данных трехмерного моделирования измерений по методике псевдо-3D-электротомографии над моделью «Стены-Рвы». Контраст 100, вмещающая среда 30 Ом·м, объект 3000 Ом·м.

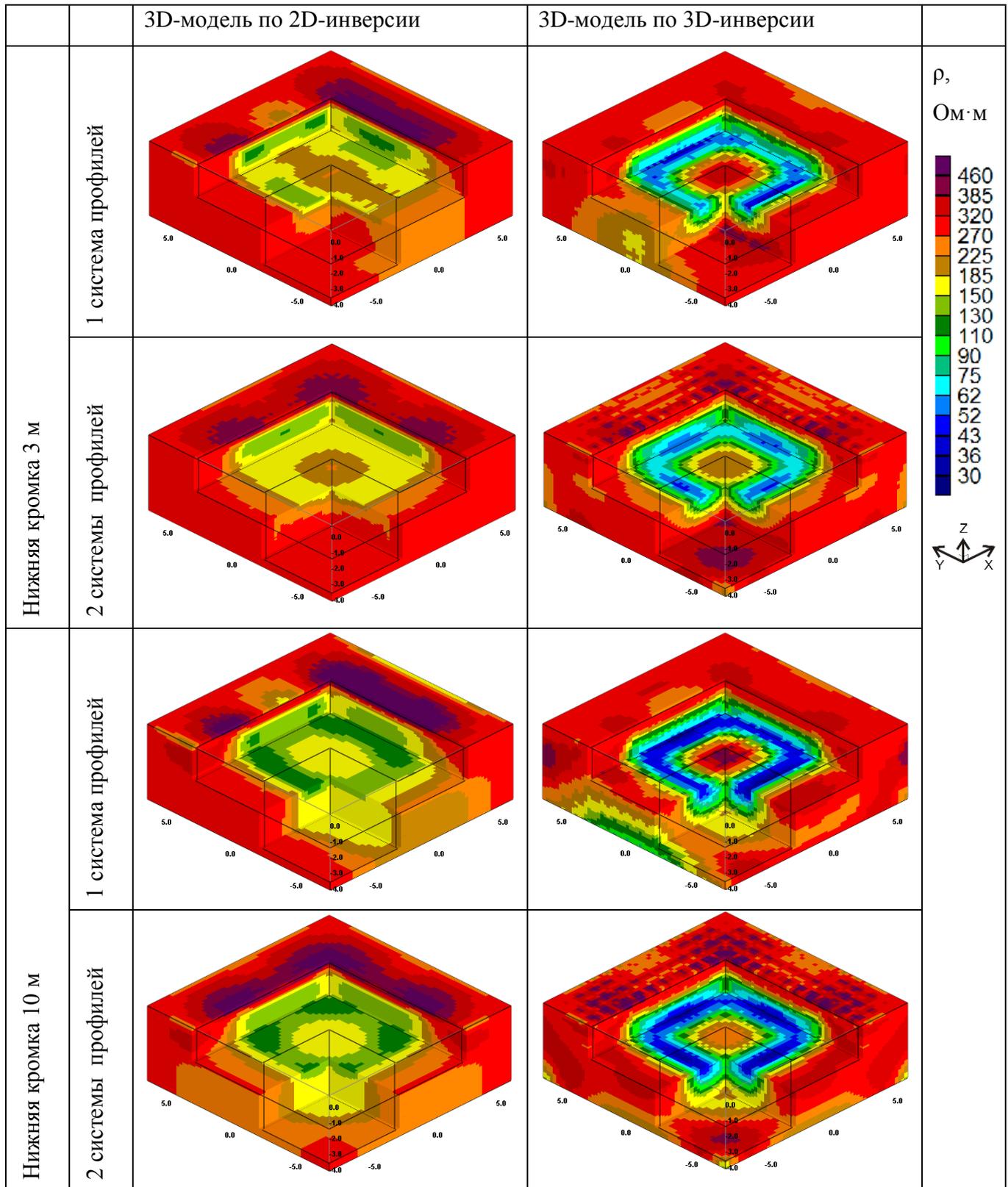


Рис. 4.5 Трехмерные геоэлектрические модели по результатам 2D- и 3D-инверсии данных трехмерного моделирования измерений по методике псевдо-3D-электротомографии над моделью «Стены-Рвы». Контраст 0.1, вмещающая среда 300 Ом·м, объект 30 Ом·м.

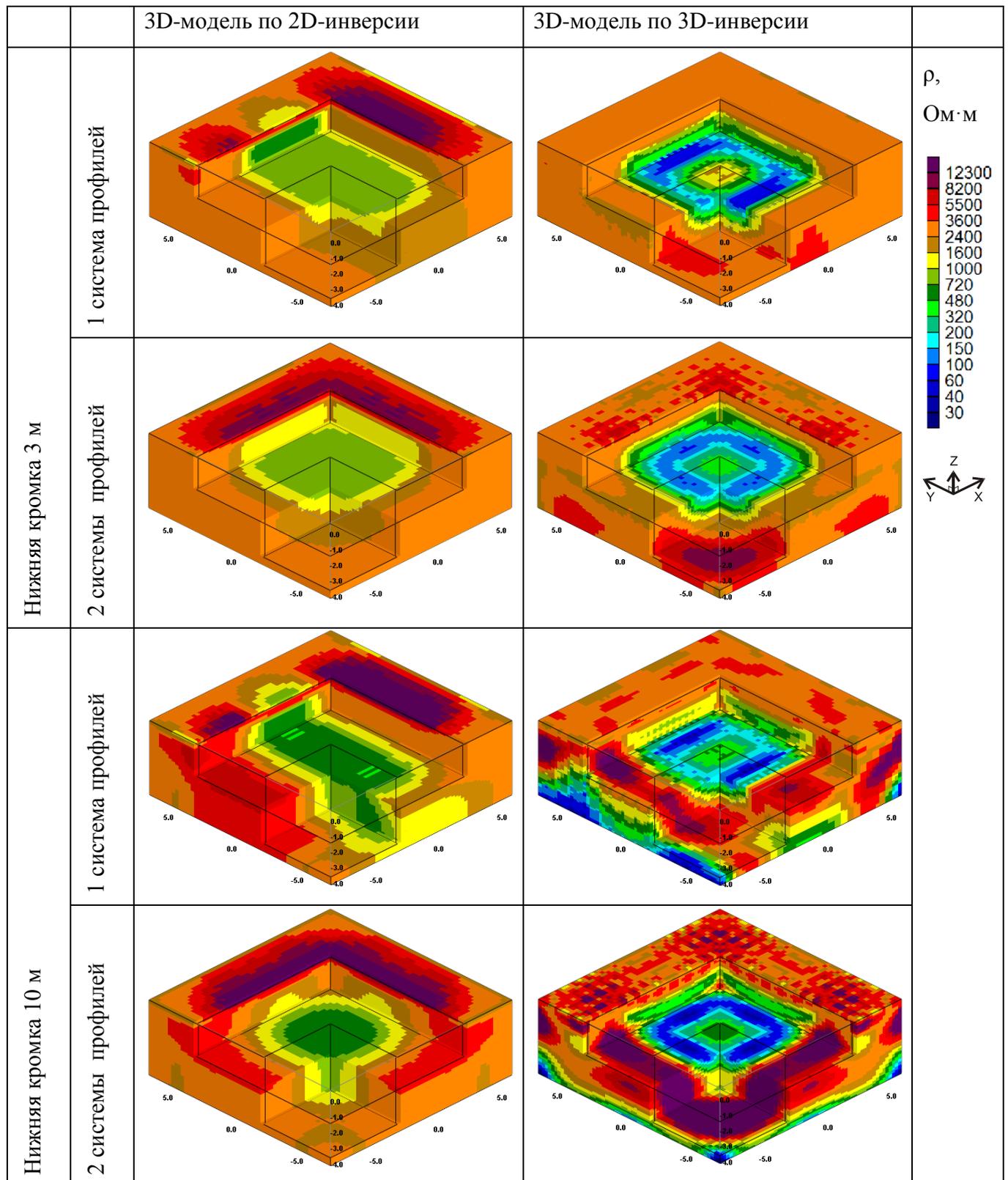


Рис. 4.6 Трехмерные геоэлектрические модели по результатам 2D- и 3D-инверсии данных трехмерного моделирования измерений по методике псевдо-3D-электротомографии над моделью «Стены-Рвы». Контраст 0.01, вмещающая среда 3000 Ом·м, объект 30 Ом·м.

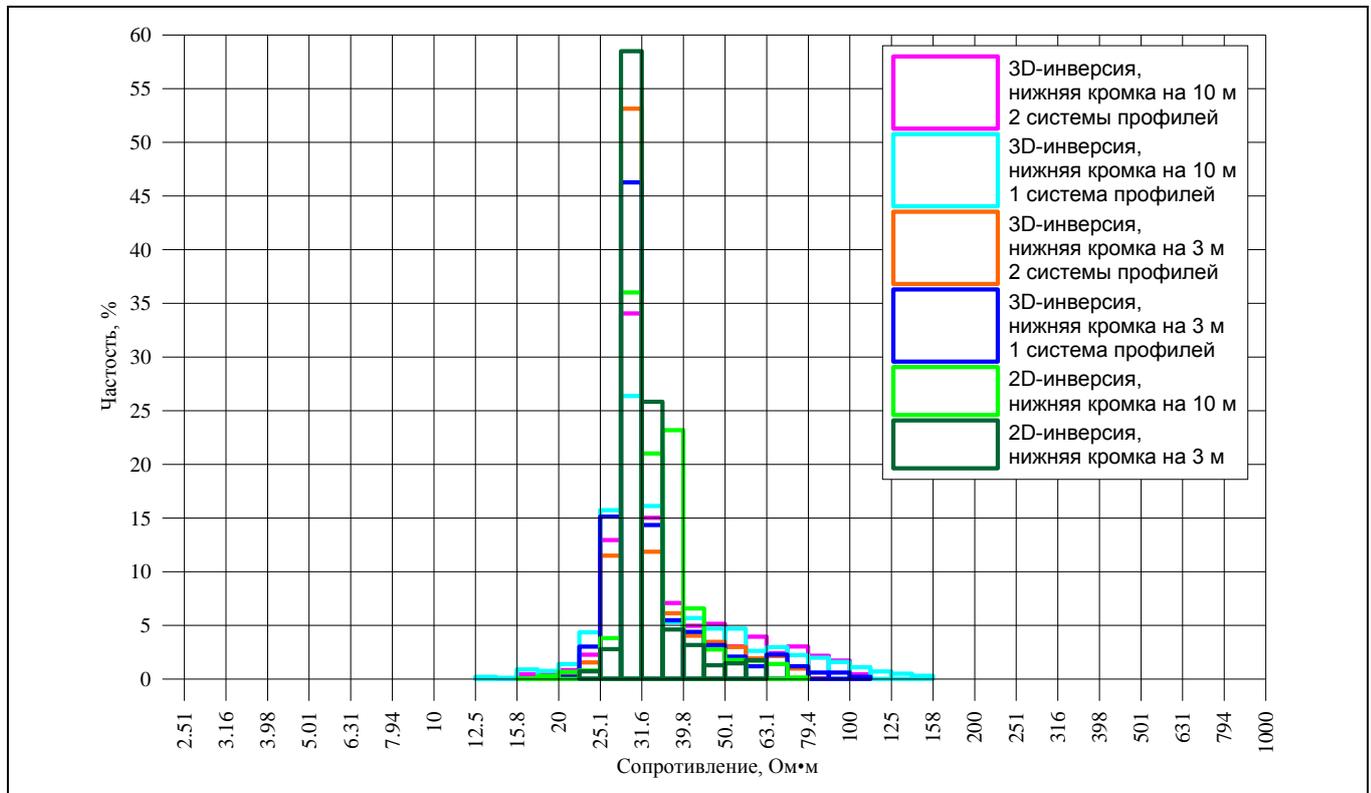


Рис. 4.7 Гистограммы распределения сопротивлений после инверсии данных для модели «Стены-Рвы» с контрастом 10 (вмещающая среда 30 Ом·м, объект 300 Ом·м).

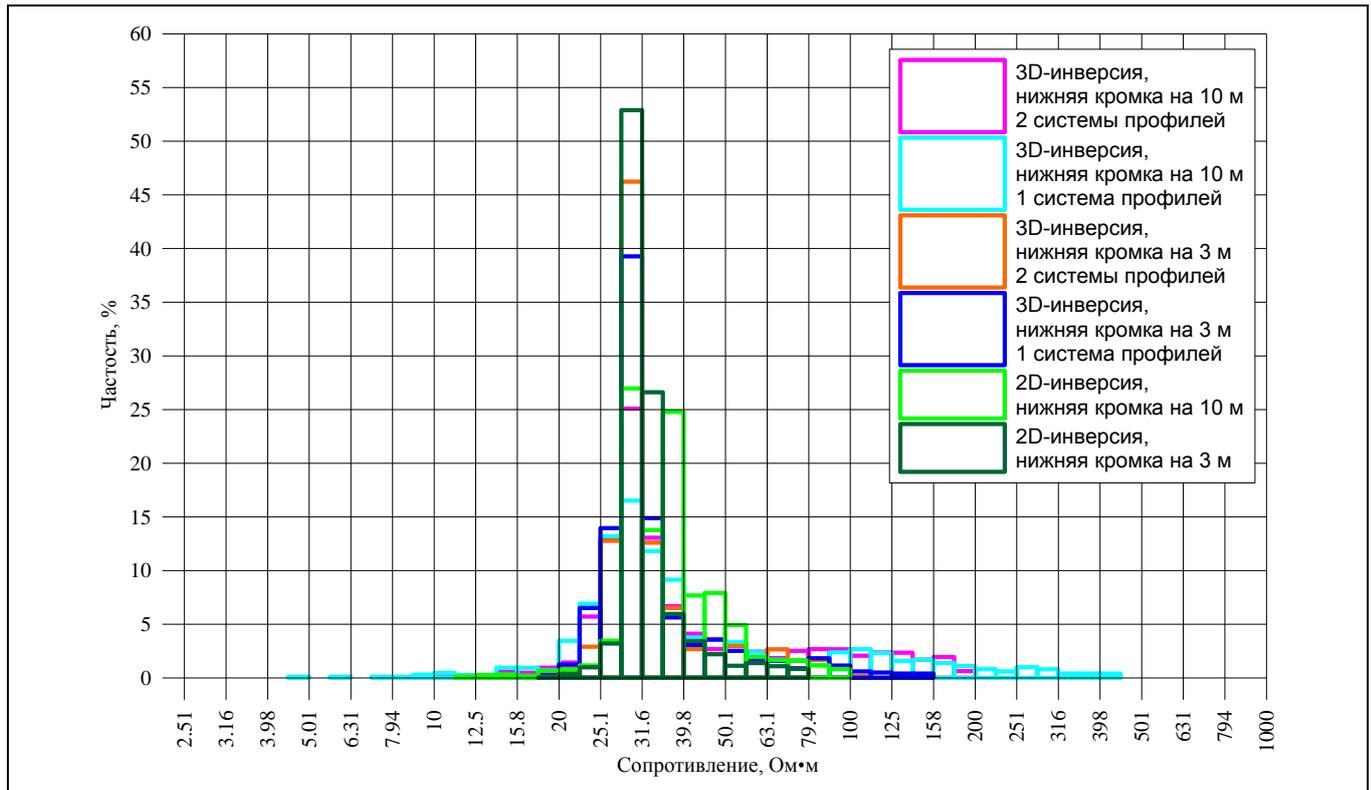


Рис. 4.8 Гистограммы распределения сопротивлений после инверсии данных для модели «Стены-Рвы» с контрастом 100 (вмещающая среда 30 Ом·м, объект 3000 Ом·м).

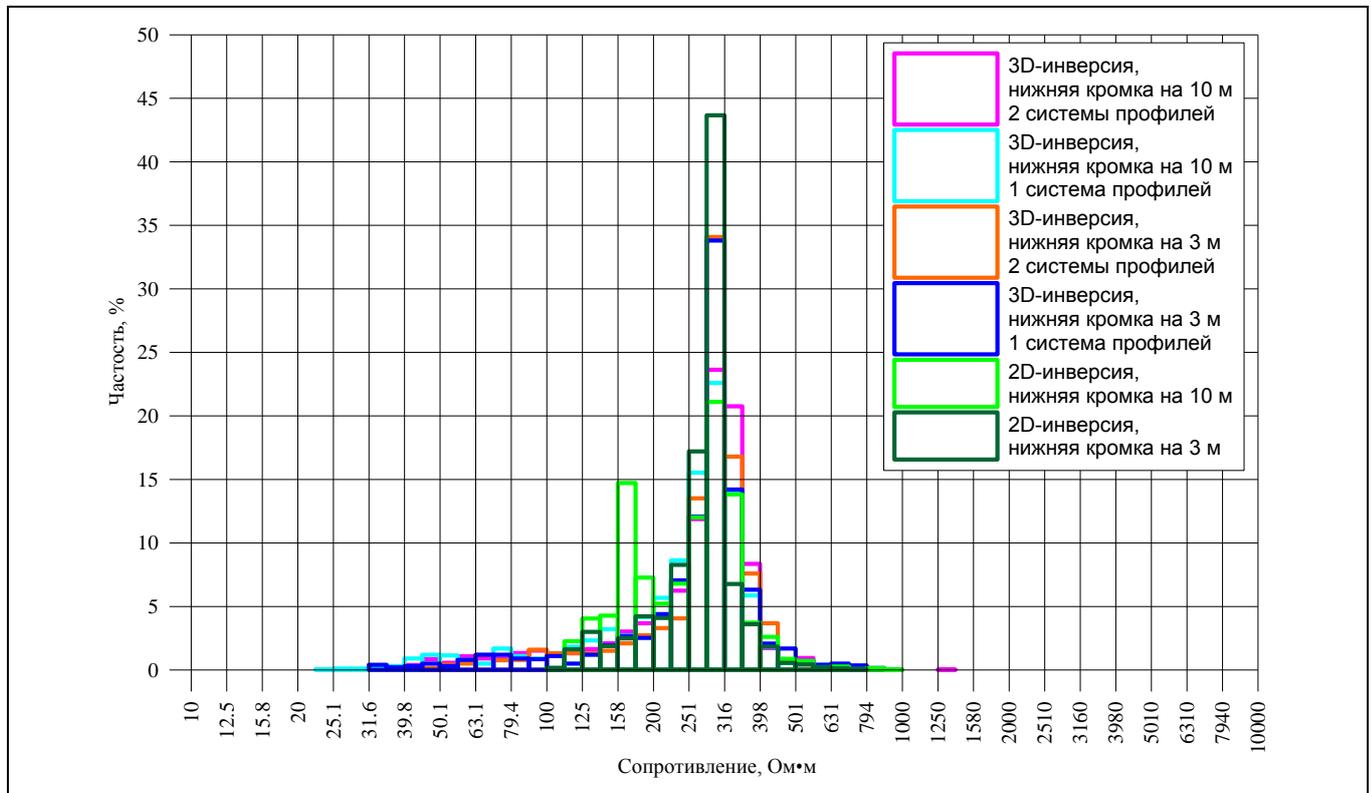


Рис. 4.9 Гистограммы распределения сопротивлений после инверсии данных для модели «Стены-Рвы» с контрастом 0.1 (вмещающая среда 300 Ом·м, объект 30 Ом·м).

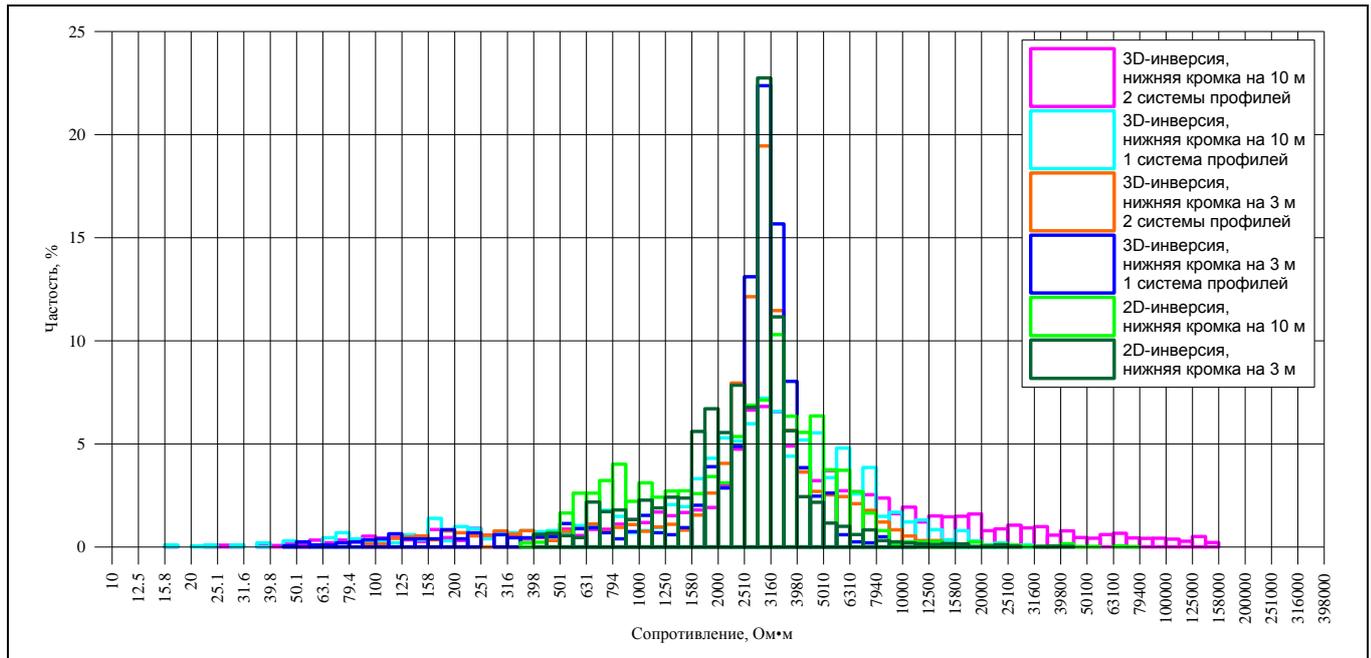


Рис. 4.10 Гистограммы распределения сопротивлений после инверсии данных для модели «Стены-Рвы» с контрастом 0.01 (вмещающая среда 3000 Ом·м, объект 30 Ом·м).

На гистограммах основной пик соответствует, очевидно, сопротивлению вмещающей среды. Ярко выраженного пика на сопротивлении аномального объекта почти нигде не наблюдается, только для данных 2D-инверсии по одной системе профилей и с нижней кромкой на 10 м при проводящем включении есть второй пик, соответствующий аномальному объекту, хотя по сопротивлению он отличается от заданного в стартовой модели. Из этого факта можно сделать 2 вывода: 1) статистически при всех выбранных методиках и способах обработки (2D- или 3D-) невозможно восстановление реального сопротивления аномального включения – объекта «Стены-Рвы» – по данным инверсии; 2) наличие пика хотя бы у одной модели по 2D-инверсии дает возможность выделять аномальный объект на основе гистограммы, поэтому здесь по статистическим параметрами 2D-инверсия показала чуть лучшие результаты, чем 3D.

По диапазону сопротивлений заметно, что наиболее «трудным» случаем оказался контраст 0.01: эти гистограммы самые широкие и, соответственно, самые низкие (максимум составляет 25% для 2D-инверсии с нижней кромкой на 3 м). Они же отвечают моделям с самыми сильными и масштабными краевыми и сопряженными искажениями.

Нужно отметить, что гистограммы были построены по данным только инверсии, без интерполяции на единую сеть, поэтому для двумерных данных гистограмма только одна – гистограммы для данных по одной и двум системам профилей в этом случае, очевидно, совпадают.

5. Опыт применения псевдо-3D-электротомографии при решении задач детального геоэлектрического картирования

Основной целью проведения полевых экспериментов было оценить эффективность применения методики при решении различных задач малоглубинной электроразведки и определить временные затраты на измерения, обработку данных и интерпретацию результатов методики псевдо-3D-съемки. Для этого требовалось провести полный цикл исследований по методике псевдо-3D: измерения, обработку и интерпретацию данных.

Все электроразведочные измерения проводились при помощи электроразведочной станции «Омега-48» (Инструкция..., 2010), предназначенной для проведения 2D-электротомографии.

Всего по методике псевдо-3D-электротомографии было снято 11 планшетов: планшет на Александровском плато, планшет на пойме р. Воря, 4 планшета рядом с с. Шекшово, планшет на стадионе в г. Москва, 4 планшета в с. Бородино.

Для того чтобы провести оценку степени влияния ориентации профилей на результаты полевых исследований в рамках выбранной методики, большинство участков были сняты по двум перпендикулярным системам параллельных профилей. Приведенные ниже результаты по некоторым планшетам так же, как и описанные выше результаты моделирования, позволили

сформулировать методические рекомендации к построению сети наблюдений и определить преимущества и недостатки псевдо-3D-электротомографии в сравнении с альтернативными способами и методиками изучения сложно построенных сред.

Александровское плато

Измерения проводились на территории Александровского моренного плато (Калужская обл., д. Александровка). Верхняя часть осадочного чехла в районе исследований сложена преимущественно ледниковыми четвертичными отложениями (Лаврушин Ю.А., 1997), среди которых выделяются моренные, суглинистые горизонты и флювиогляциальные песчано-гравийные отложения. Флювиогляциальные отложения на плато представляют из себя, в основном, пески, сопротивление которых меняется в зависимости от их влажности и пористости от 250 до 10000 Ом·м. Моренные суглинки имеют сопротивление 30-150 Ом·м. Среда с таким большим контрастом сопротивлений слоев (до 2 порядков) является интересным объектом для изучения с помощью псевдо-3D-методики. Конкретное местоположение планшета съемки было выбрано на основе результатов других геофизических методов (Бобачев А.А., Ерохин С.А., 2010): интерпретация данных комплекса методов показывает, что здесь среда неоднородна в вертикальном и горизонтальном направлении.

Размеры планшета составляли 47 х 47 м. Съемка проходила с двумя взаимно перпендикулярными ориентациями профилей: сначала по оси X (запад-восток), затем по оси Y (юг-север) – поляризации X и Y соответственно (Рис. 4.11). Шаг по профилю составлял 1 м, между профилями – 2 м, использовалась комбинированная трехэлектродная установка Шлюмберже с

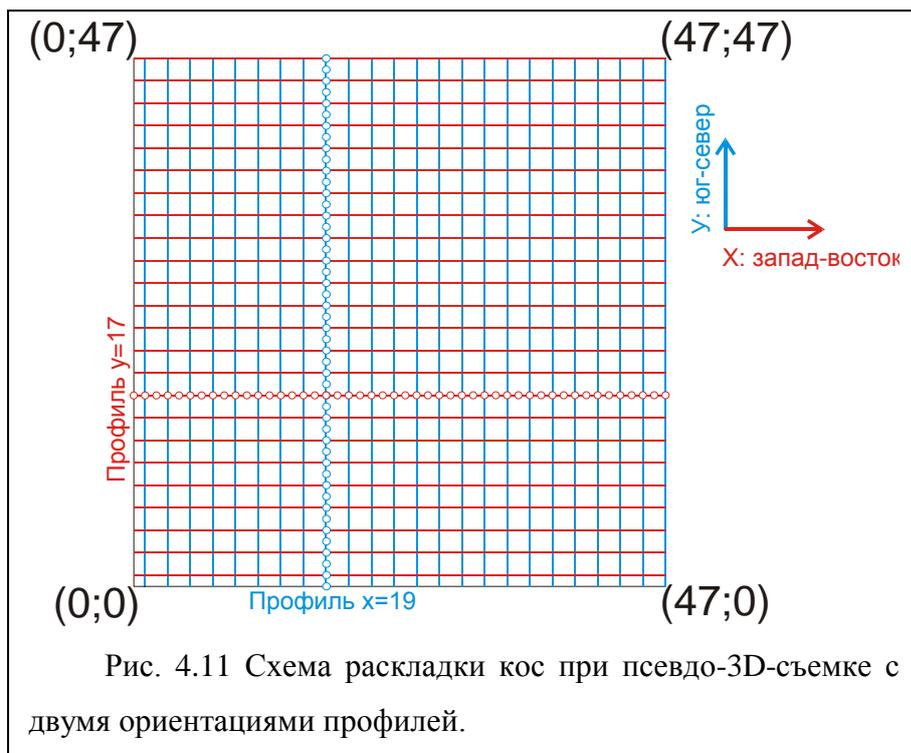


Рис. 4.11 Схема раскладки кос при псевдо-3D-съемке с двумя ориентациями профилей.

разносами от 1.5 м до 36.5 м. По двум поляризациям было снято 48 профилей по 47 м каждый. Общее количество измерений для двух ориентаций – 52800.

Электротомография сопровождалась съемкой рельефа по сети 2 х 2 м (Рис. 4.12), что позволило проводить инверсию данных с учетом топографии.

В полевых работах принимали участие 5 человек. Суммарное время, затраченное на измерения при условии спокойного рельефа, благоприятных солнечных погодных условий и отсутствия растительности, составило около 12 часов. Общее рабочее время было разбито на 2 дня по 6 рабочих часов.

3D-инверсия данных была проведена в программе Res3DInv (Loke M., 1996-2009) с одинаковыми пара-

метрами отдельно для каждой ориентации и для объединенных данных.

По результатам измерений были построены гистограммы распределения кажущегося сопротивления и сопротивления, полученного по результатам инверсии (Рис. 4.13). На гистограмме распределения кажущегося сопротивления выделяется несколько пиков: на 100-400 Ом·м, на 1000-4000 Ом·м и на 4000-10000 Ом·м, - которые соответствуют геoeлектрическим комплексам разной литологии. На гистограмме сопротивления по результатам инверсии пики меняют форму и центральное значение: пик на сопротивлениях 50-150 Ом·м соответствует суглинистым отложениям, а пики на 250-600 Ом·м и 1000-10000 Ом·м – флювиогляциальным пескам различной влажности.

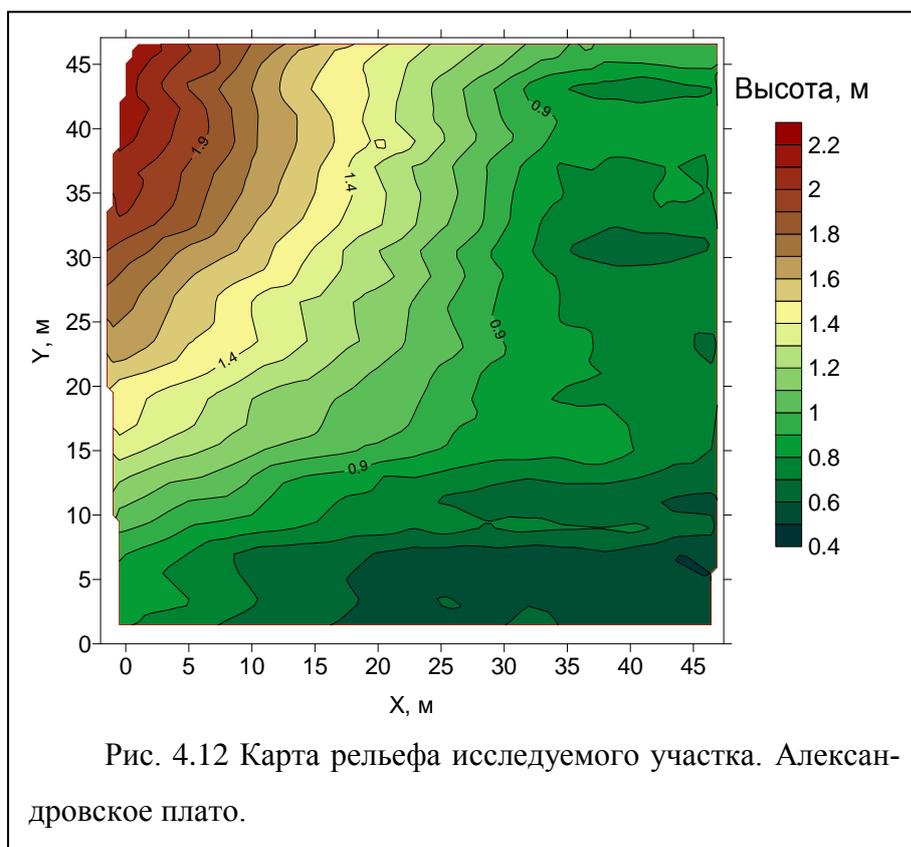
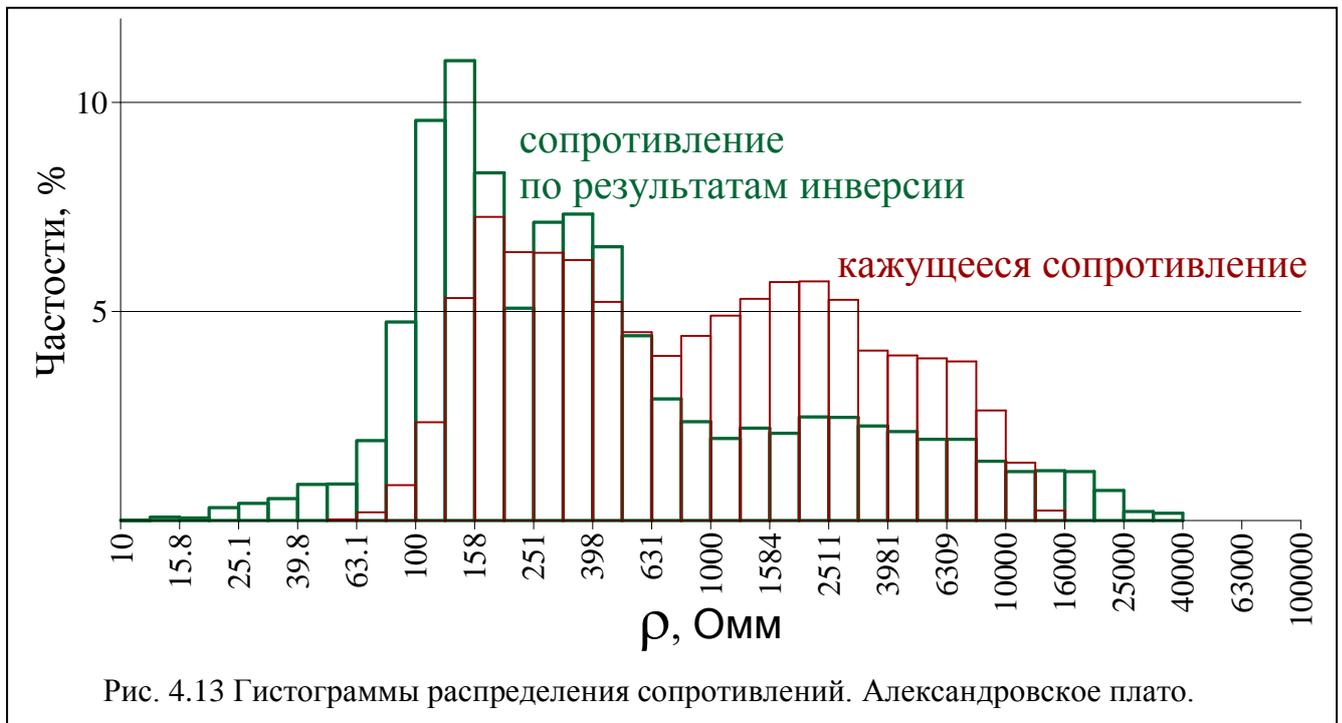


Рис. 4.12 Карта рельефа исследуемого участка. Александровское плато.



Для каждой ориентации профилей и для объединенных данных в результате 3D-инверсии была получена геоэлектрическая модель изучаемой среды (последняя - Рис. 4.14). Геологическая модель построена на основе геоэлектрической в соответствии с представлениями о строении разреза в районе работ (Рис. 4.15). Структура разреза подтверждается данными, полученными по скважинам (Васильев А.Г., 2008).

На срезе геоэлектрической модели по объединенным данным видны четыре слоя (Рис. 4.14, Рис. 4.15): верхний высокоомный слой флювиогляциальных песков имеет среднюю мощность около 2.5 м; под ним залегает проводящий прослой суглинков мощностью 1.5 м; нижележащий слой песчаных отложений имеет мощность до 4.5-5 м; основание разреза сложено моренными проводящими суглинками. Суглинки обоих слоев имеют значения сопротивления менее 150 Ом·м, а сопротивления песчаных слоев сильно отличаются между собой: поверхностный слой песков обладает сопротивлением 1000-10000 Ом·м (и выше), а нижний слой песков, расположенный между суглинками, - 250-600 Ом·м.

Такое различие в сопротивлениях связано с существенным увеличением влажности вниз по разрезу в зоне аэрации: верхние пески – очень маловлажные или почти сухие, а нижние – более водонасыщенные.

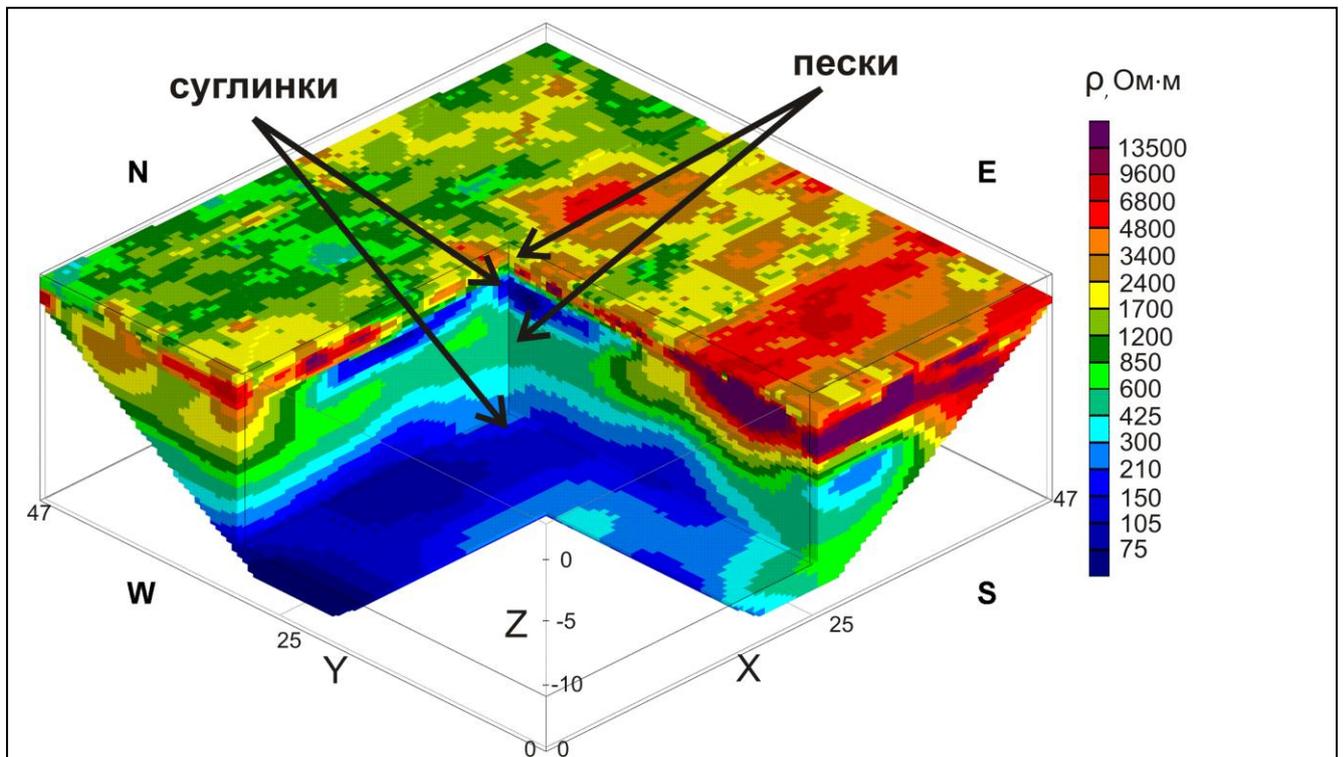


Рис. 4.14 Срез геоэлектрической модели, полученной в результате 3D-инверсии по объединенным данным двух ориентаций. Александровское плато.

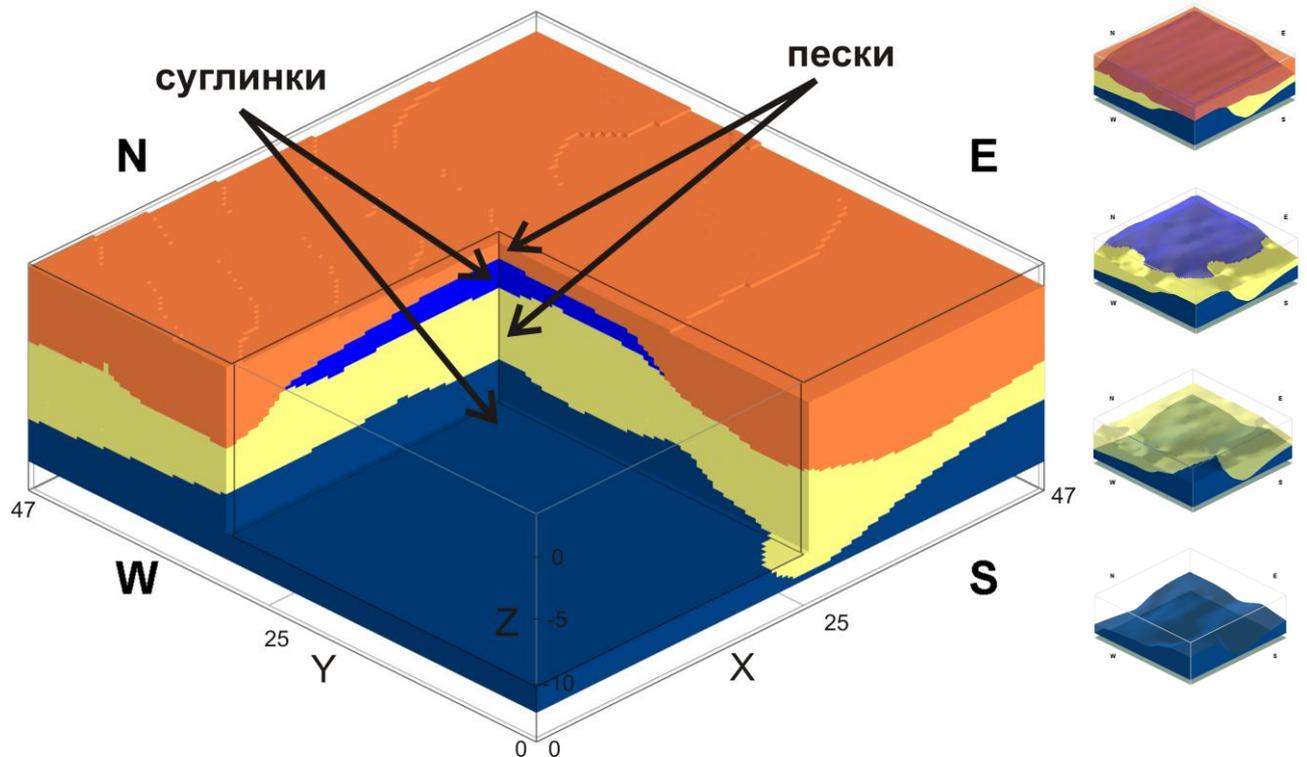
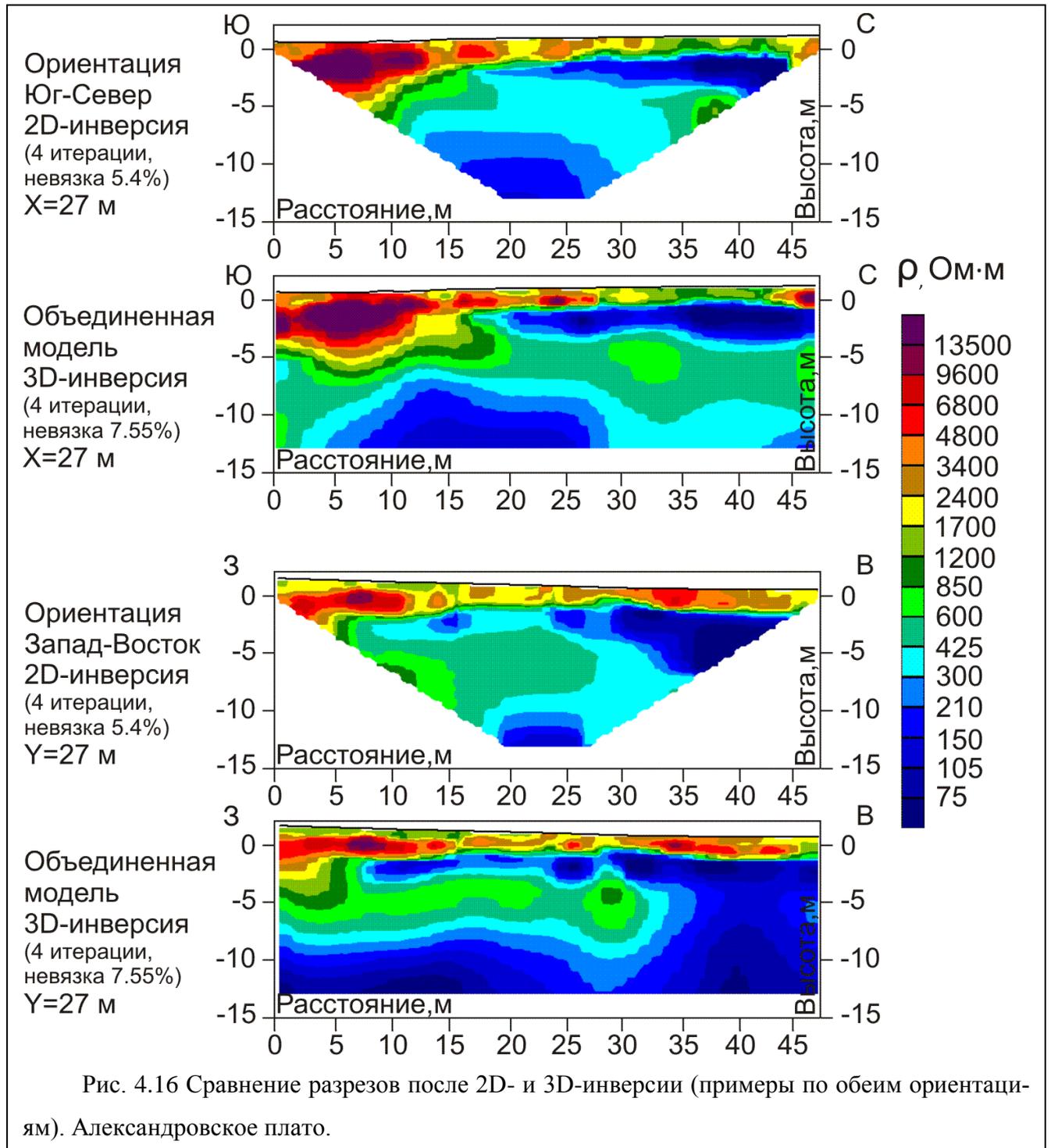


Рис. 4.15 Схематичная геологическая модель по результатам псевдо-3D-съемки (справа показана та же модель с последовательно срезанными по границе раздела слоями). Александровское плато.

На основе этого полевого эксперимента было решено сравнить результаты обработки данных в рамках двумерного и трехмерного подходов при исследовании типовой геоэлектрической

ской среды. Я сравнила результаты 2D-инверсии (Res2DInv, Loke M., 1996-2009) по профилю традиционной 2D-электротомографии и срез трехмерной геоэлектрической модели, полученной после 3D-инверсии данных псевдо-3D-электротомографии. Сравнение разрезов 2D-инверсии по отдельному профилю и срезов модели по 3D-инверсии (Рис. 4.16) показывает, что после 3D-инверсии контраст сопротивлений между слоями суглинков и песков выше, а зоны максимального градиента сопротивлений, отвечающие положению границ, более выдержаны по простиранию, что позволяет увереннее выделять положение разных горизонтов.



При одинаковой контрастности модель по объединенным данным можно считать более надежной и достоверной: она, благодаря сети наблюдений, охватывает больший объем изучаемой среды, учитывает измерения обеих ориентаций и является сравнительно более гладкой и детальной. Принимая ее за эталонную, мы имеем возможность сравнивать с ней модели по разным ориентациям и в каждом случае оценивать точность решения поставленной задачи и корректность полученного результата (Рис. 4.17).

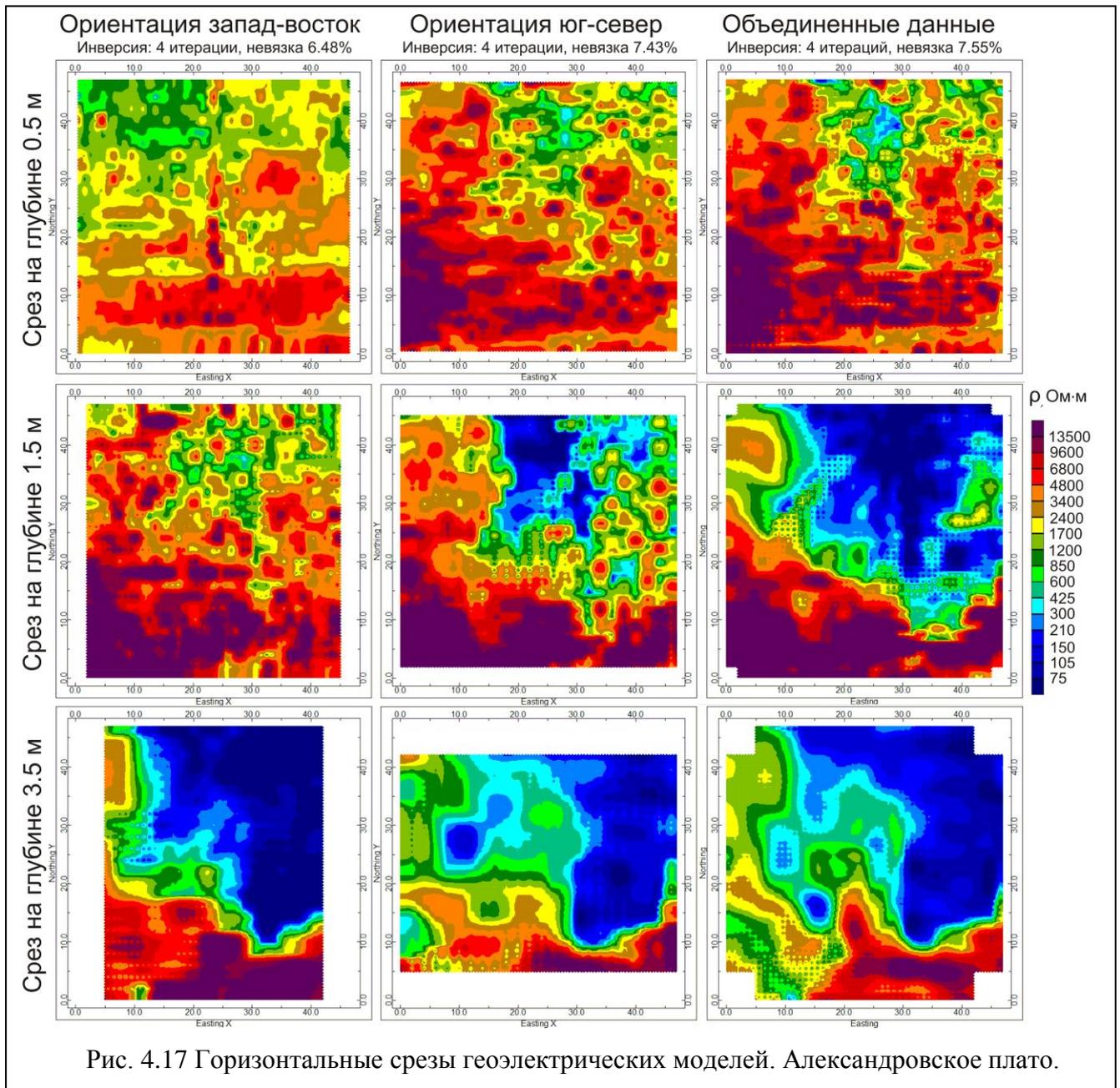


Рис. 4.17 Горизонтальные срезы геоэлектрических моделей. Александровское плато.

Можно отметить некоторые отличия между геоэлектрическими моделями: например, на глубине 0.5 м модель по ориентации восток-запад имеет зону пониженных сопротивлений в северо-западной части планшета, а две другие модели – в северо-восточной, а на глубине 1.5 м на модели по ориентации восток-запад все еще преобладают песчаные отложения, в то время как

на двух других моделях фиксируется слой суглинков, подстилающих поверхностный слой (северо-восточный угол).

В целом, степень корреляции объединенной модели с моделью по ориентации юг-север выше, чем с моделью по ориентации восток-запад, - это показывает наличие зависимости между ориентацией профилей и результирующей геоэлектрической моделью. Вероятнее всего, разница обусловлена контрастом сопротивлений и конфигурацией неоднородностей. Также на это могут влиять краевые эффекты инверсии, случайные помехи, различное распределение чувствительности измерительных установок и т.д. Общая невязка между парами моделей рассчитана по формуле 4.1 и представлена в Табл. 4.3.

$$\rho_{\%} = \sum_{k=1}^N \frac{\rho_k^i - \rho_k^j}{\frac{\rho_k^i + \rho_k^j}{2}} \cdot 100\% = \sum_{k=1}^N 2 \cdot \frac{\rho_k^i - \rho_k^j}{\rho_k^i + \rho_k^j} \cdot 100\%, \quad 4.1$$

где i и j задают пару моделей, между которыми считается невязка (например, i – модель после 2D-инверсии данных с ориентацией профилей Запад-Восток, а j – модель после 3D-инверсии данных профилей с ориентацией Север-Юг), а N – количество общих точек для данной пары моделей.

Табл. 4.3 Невязка между геоэлектрическими моделями. Александровское плато.						
Модели		Запад-Восток		Юг-Север		Объединенная
		2D-инверсия	3D-инверсия	2D-инверсия	3D-инверсия	
Запад-Восток	2D-инверсия	0%	50.8%	33.4%	40%	44.3%
	3D-инверсия	-	0%	57.5%	57.6%	59.3%
Юг-Север	2D-инверсия	-	-	0%	34.3%	44.9%
	3D-инверсия	-	-	-	0%	40.5%
Объединенная	3D-инверсия	-	-	-	-	0%

Измерения на этом участке были первым опытом опробования методики псевдо-3D-электротомографии с двумя азимутами профилей. Методика дала успешные результаты. Во-первых, была получена трехмерная геоэлектрическая модель среды. На ее основе с учетом данных скважин и многолетних геофизических измерений была построена глубинная геологическая (литологическая) модель участка. Во-вторых, по проведенным оценкам производительность методики оказалась сравнительно высокой.

Также был сделан ряд важных методических выводов:

- геоэлектрические модели, полученные в результате трехмерной и двумерной обработки измерений на одном и том же планшете могут иметь отличия с точки зрения

геологической интерпретации (разная площадь распространения отложений, разная глубина границы между литологическими комплексами);

- использование двух поляризаций качественно улучшает результат и увеличивает гладкость и детальность,
- существует наличие зависимости параметров результирующей модели от азимута профилей, она может определяться строением среды.

Пойма р. Воря

Измерения проводились на территории поймы р. Воря (Калужская обл., д. Александровка). Верхняя часть разреза

здесь сложена пойменными четвертичными песчано-суглинистыми отложениями. Интерес к изучению именно этого участка возник вследствие обнаружения в этом месте палеорусла р. Воря: такое предположение было высказано на основе топографических особенностей участка (Рис. 4.18), космических фотоснимков и данных комплексных геоэлектрических методов (Шевнин В.А. и др., 2013). Положение палеорусла соответствует линейно вытянутому с севера на юг оврагу глубиной около 2 м. Контраст сопротивлений пород в приповерхностной области относительно невелик, аллювиальные пойменные отложения в верхней части (в том числе откосы оврага) преимущественно представляют из себя влажные и водонасыщенные смешанные песчано-суглинистые отложения с сопротивлением 40-150 Ом·м. Отложения палеорусла, выстилающие дно оврага, это русловые пески, на которых сверху залегают суглинки. Они лучше сортированы и стратифицированы, чем пойменные отложения, поэтому отличаются по сопротивлению: УЭС песков составляет от 80 до 200 Ом·м, УЭС суглинков составляет от 30 до 50 Ом·м. Такое строение среды с линейной прямой неоднородностью, пересекающей весь планшет с юга на север, можно с высокой точностью аппроксимировать двумерной моделью. Поэтому главной задачей

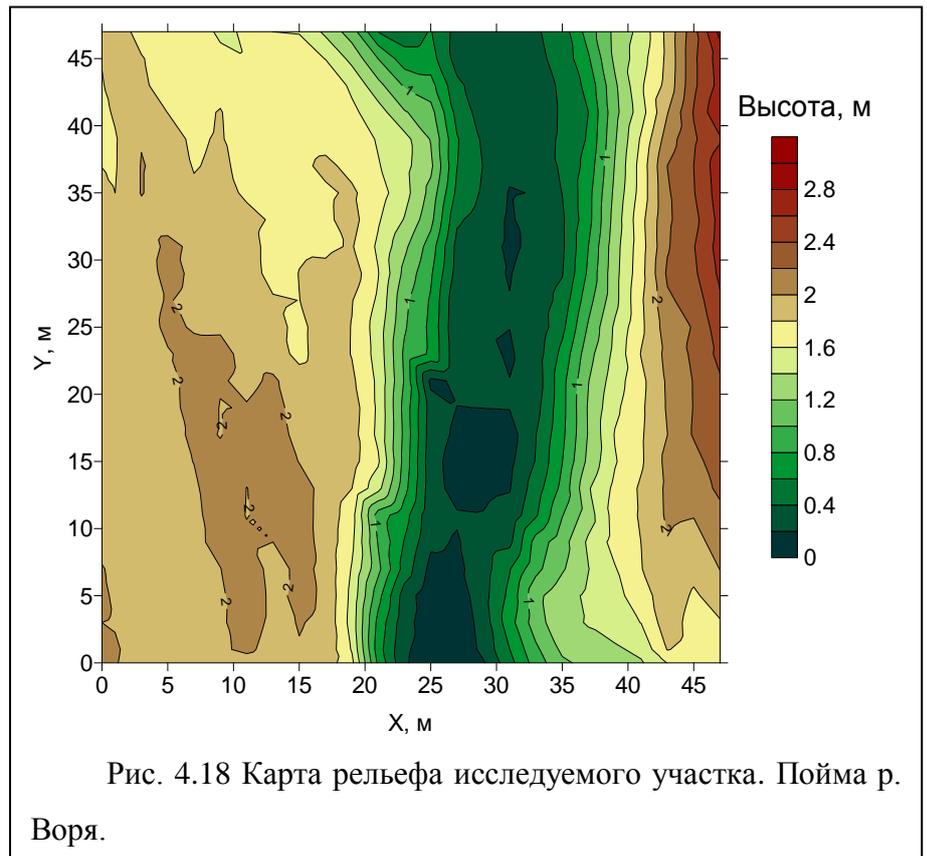


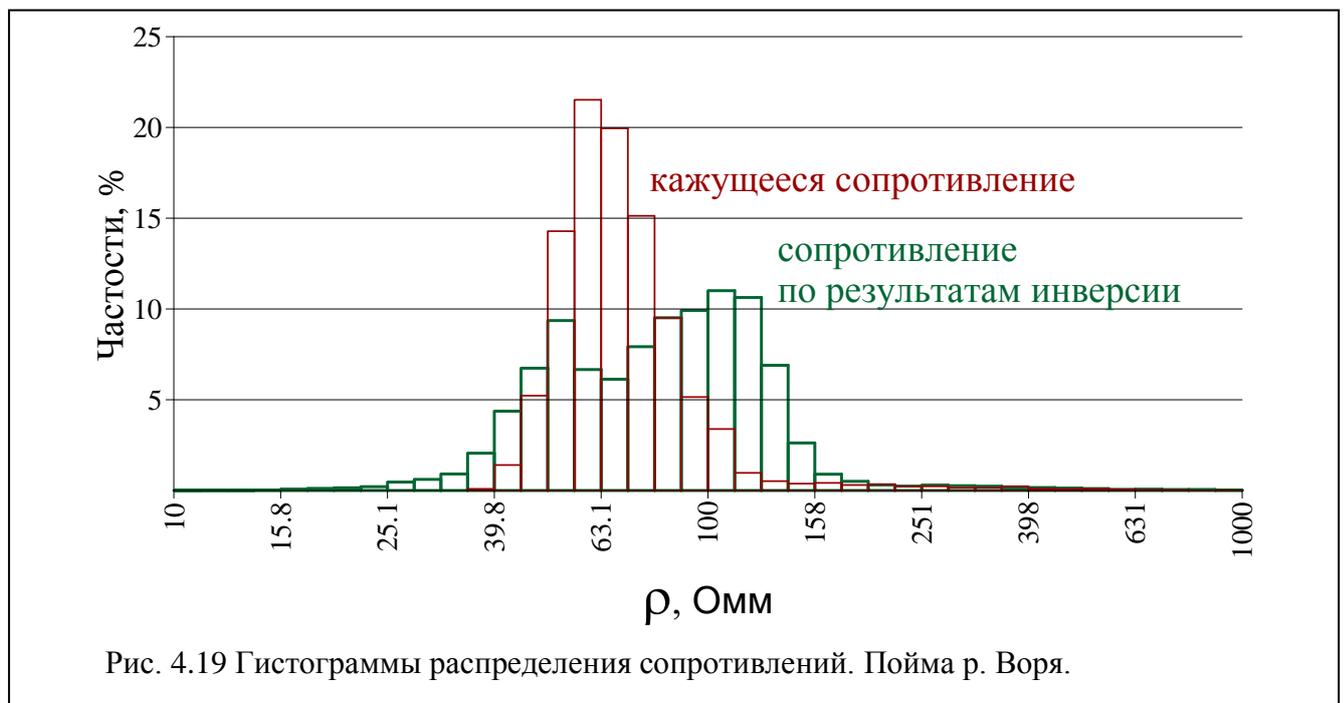
Рис. 4.18 Карта рельефа исследуемого участка. Пойма р. Воря.

Положение палеорусла соответствует линейно вытянутому с севера на юг оврагу глубиной около 2 м. Контраст сопротивлений пород в приповерхностной области относительно невелик, аллювиальные пойменные отложения в верхней части (в том числе откосы оврага) преимущественно представляют из себя влажные и водонасыщенные смешанные песчано-суглинистые отложения с сопротивлением 40-150 Ом·м. Отложения палеорусла, выстилающие дно оврага, это русловые пески, на которых сверху залегают суглинки. Они лучше сортированы и стратифицированы, чем пойменные отложения, поэтому отличаются по сопротивлению: УЭС песков составляет от 80 до 200 Ом·м, УЭС суглинков составляет от 30 до 50 Ом·м. Такое строение среды с линейной прямой неоднородностью, пересекающей весь планшет с юга на север, можно с высокой точностью аппроксимировать двумерной моделью. Поэтому главной задачей

в этом исследовании было выяснить, как меняется полученная по методике псевдо-3D-электротомографии геоэлектрическая трехмерная модель в зависимости от ориентации параллельных профилей вдоль и поперек главной оси двумерной неоднородности.

Система наблюдений при съемке этого планшета и полный граф обработки были такими же, как при съемке планшета на Александровском плато, и описаны выше (Рис. 4.11). В полевых работах принимали участие опять же 5 человек. Суммарное время, затраченное на измерения в условиях относительно спокойного рельефа, но при наличии высокой травы и дождливых погодных условий, составило около 18 часов. Общее рабочее время было разбито на 3 дня по 6 рабочих часов.

По результатам измерений были построены гистограммы распределения кажущегося сопротивления и истинного сопротивления, полученного после инверсии (Рис. 4.19). При анализе гистограмм видно, что инверсия увеличила диапазон сопротивлений (ширина распределения стала больше). На гистограмме для кажущегося явно выделяется только один пик, а по результатам инверсии отчетливо разделяются уже два пика: один соответствует пескам (80-150 Ом·м), другой суглинкам (30-60 Ом·м). Если сравнить с участком на Александровском плато (выше), там контраст сопротивлений (двух максимумов гистограмм) был более 10 раз, а здесь всего 2-4 раза.



Отдельно для каждой ориентации профилей и для объединенных данных в результате 3D-инверсии была получена геоэлектрическая модель изучаемой среды. На Рис. 4.20 изображена только модель по объединенным данным, угловой срез на модели позволяет зафиксировать и описать особенности строения геоэлектрической среды. На ее основе, как и в случае съемки планшета на Александровском плато, была построена общая геологическая модель (Рис. 4.21).

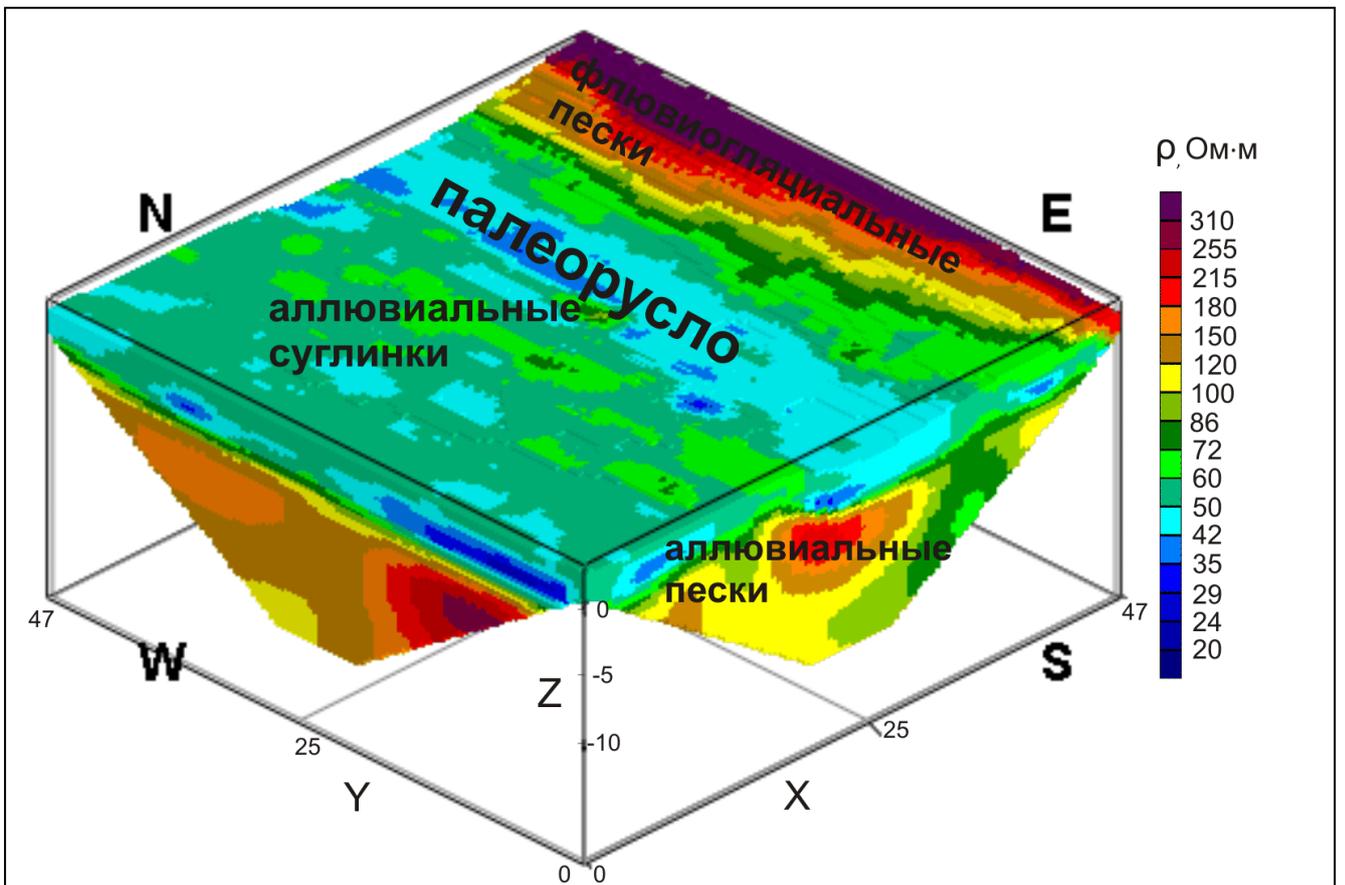


Рис. 4.20 Геоэлектрическая модель по объединенным данным. Пойма р. Воря.

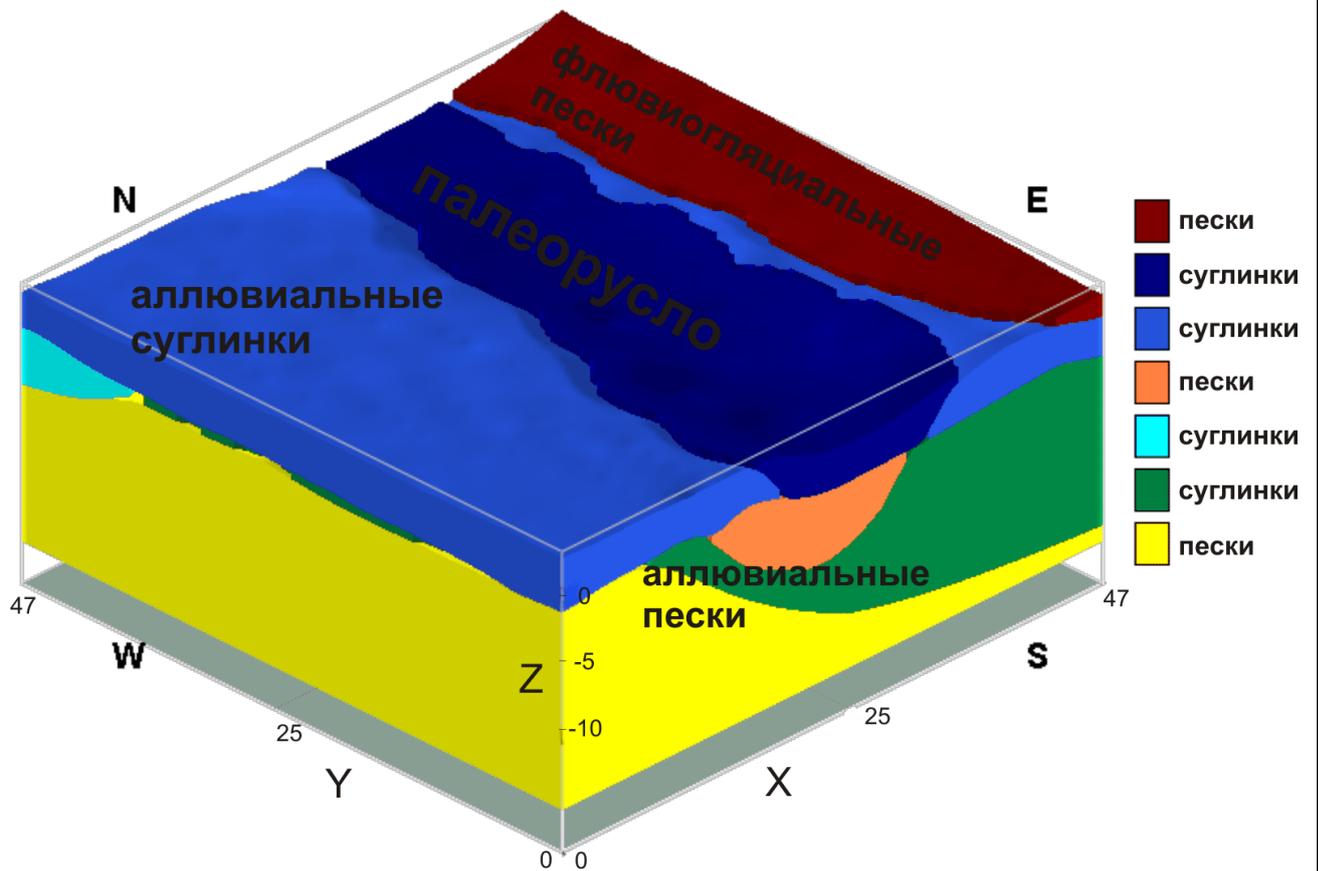


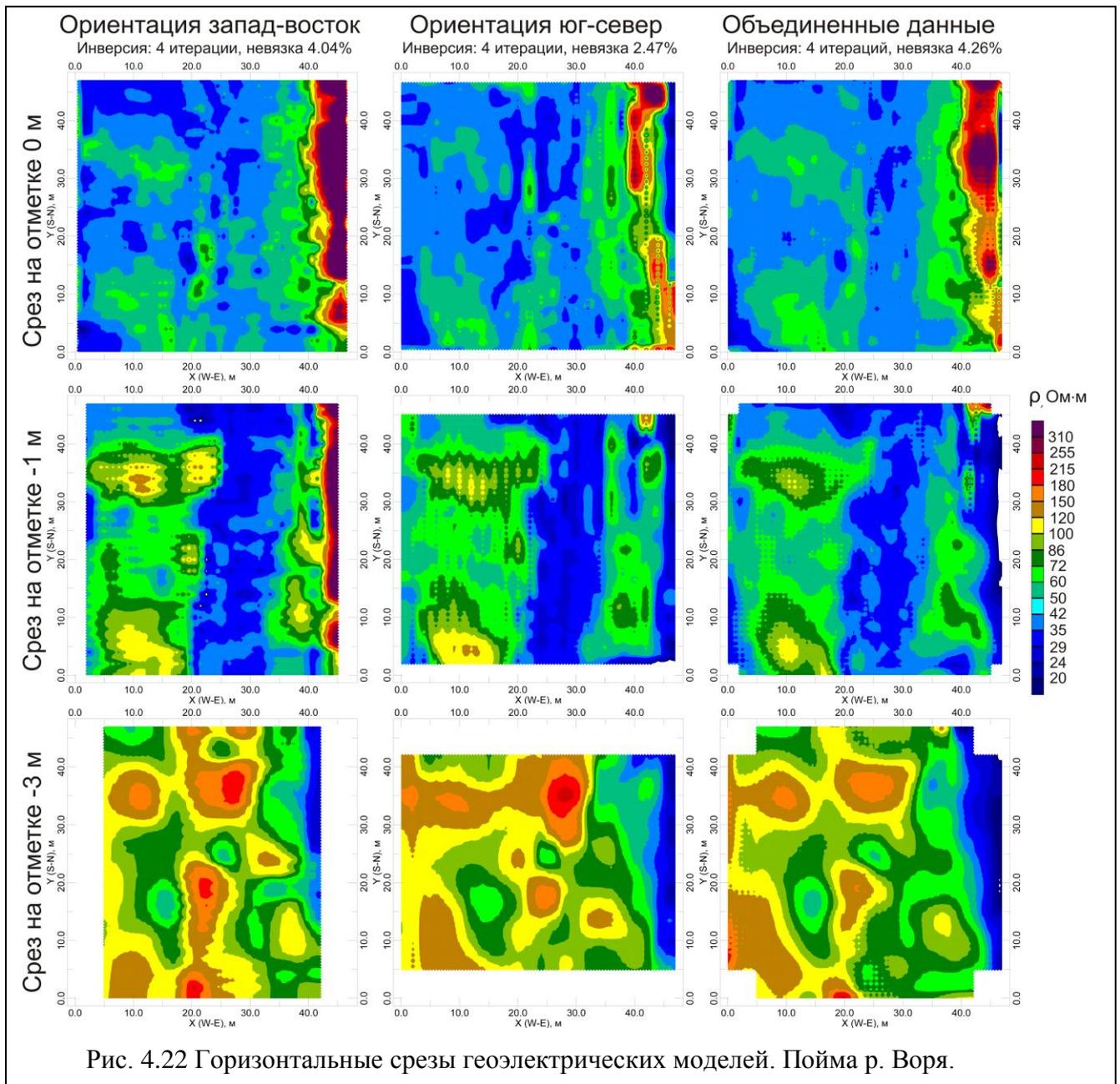
Рис. 4.21 Схематичная геологическая модель по результатам псевдо-3D-съемки. Пойма р. Воря.

Верхняя часть разреза почти полностью сложена относительно проводящими суглинстыми пойменными отложениями, за исключением восточного края планшета, где начинается залесенное на местности поднятие рельефа, сложенное высокоомными песками. Судя по высоким значениям сопротивления последних (более 400 Ом·м), вероятно, это либо маловлажные или сухие пойменные песчаные отложения, либо, более вероятно, край слоя флювиогляциальных песков, распространенных на востоке от участка. Основание модели сложено относительно высокоомными (по сравнению с суглинками) пойменными песками. На фоне общего двухслойного строения в приповерхностной области отчетливо прослеживается линейная проводящая аномальная зона, вытянутая с юга на север, совпадающая с положением минимальных отметок рельефа. На срезе видно, что она является переуглублением слоя суглинков в слой нижележащих песков. Кроме того, суглинки в этой зоне более глинистые, и уровень их сопротивлений несколько ниже. А непосредственно под суглинками залегает такая же линейная аномальная высокоомная зона, отвечающая аллювиальным пескам. Это подтверждает исходное предположение о наличии на планшете палеорула р.Воря.

На Рис. 4.22 изображены горизонтальные срезы трех трехмерных геоэлектрических моделей: с ориентацией профилей Юг-Север, Запад-Восток и объединенная модель. Опять наблюдается, как и для планшета на плато, некоторая зависимость между ориентацией профилей и результирующей геоэлектрической моделью: первые две модели (левый и центральный столбцы изображений) наиболее существенно отличаются по уровню сопротивлений на отметке -1 м в области восточного края планшета. Опять принимая за сравнительный эталон модель по объединенным данным, можно заключить также, что обе модели, в целом, структурно дают примерно одинаковый результат. Отличие, наблюдаемое на срезе на отметке -1 м вдоль восточного края планшета, вероятнее всего, обусловлено краевыми эффектами инверсии, вызванными разной плотностью данных. Целевой же объект – проводящее палеоруло – выделяется в виде линейной проводящей аномалии на всех моделях.

Общая невязка между парами моделей рассчитана по формуле 4.1 и показана в Табл. 4.4.

Табл. 4.4 Невязка между геоэлектрическими моделями. Пойма р. Воря.			
Модели	Запад-Восток	Юг-Север	Объединенная
Запад-Восток	0%	18.8%	14.3%
Юг-Север	-	0%	14.3%
Объединенная	-	-	0%



В этом эксперименте (в отличие от планшета на Александровском плато) принципиальное строение объемной среды, которая исследуется методом псевдо-3D-электротомографии, хорошо восстанавливается как по объединенной модели, так и по данным любой ориентации отдельно. Действительно, за исключением колебаний сопротивления и конфигурации отдельных локальных аномальных зон, все модели одинаковы: положение вертикальных и горизонтальных границ совпадает. Это означает, что съемка с использованием двух ориентаций является избыточной, поскольку при схожем результате вдвое увеличивается количество профилей, значит, вдвое снижается производительность. К тому же, вдвое возрастает стоимость таких работ. Это может быть оправдано только в очень редких случаях, когда требуется высокая точность результата и обозначенные выше колебания сопротивления в локальных областях имеют значение для интерпретации. Тем не менее, как и в предыдущем эксперименте на Александровском пла-

то, модель по объединенным данным получается более гладкой, охватывает больший объем среды и учитывает различное направление поляризации в каждой точке. Поэтому одновременно для сохранения обеих поляризаций и производительности в этом исследовании было решено уменьшить число профилей путем увеличения шага между ними (Табл. 4.5). Такое исследование также дает возможность хотя бы качественно проанализировать, как зависит результат от шага между профилями при неизменном шаге по профилю.

	Ориентация профилей по оси X		Ориентация профилей по оси Y		Обе ориентации			
	2 м	4 м	2 м	4 м	2 м	4 м	6 м	8 м
Шаг между электродами	1 м		1 м		1 м			
Шаг между профилями	2 м	4 м	2 м	4 м	2 м	4 м	6 м	8 м
Количество профилей	24	12	24	12	48	24	16	12

После проведения обработки по прореженной системе профилей я сравнила результирующие геоэлектрические модели (Рис. 4.23). Оказалось, что в этом эксперименте для конкретных полевых данных трехмерная модель, полученная по объединенной системе двух поляризаций, при прореживании и увеличении шага между профилями до 8 м, сохранила все выявленные ранее структурные особенности среды. Общее число профилей при этом составило всего 12. Неравномерность сети наблюдений не оказала большого влияния на результат (Табл. 4.6, Рис. 4.23), хотя коэффициент анизотропии сети наблюдений ($k = \text{шаг между электродами} / \text{шаг между профилями}$) составил 8, при рекомендуемой величине не более 4 (Yang X., Lagmanson M., 2006).

В то же время увеличение шага между профилями всего вдвое (до 4 м) при неизменном шаге по профилю 1 м для моделей, полученных по каждой ориентации отдельно ($k=4$, количество профилей 12), существенно сказалось на общем строении модели (Табл. 4.6, Рис. 4.23). **Синим** в Табл. 4.6 помечены повторяющиеся данные из Табл. 4.4, **красным** – модели с взаимной ошибкой более 20 %. При тех же параметрах инверсии и обработки на обеих моделях проявился очень маломощный подповерхностный слой с низкими значениями сопротивления (менее 30-40 Ом·м). Из-за компенсации этого слоя в процессе инверсии в результате сопротивления поверхностных отложений также изменились: выросли более 100 Ом·м, что уже не отвечает «вилке» сопротивлений для суглинков. Таким образом, вместо ранее выделенного слоя суглинков на поверхности оказался слой песков мощностью всего в несколько десятков сантиметров. Такое принципиальное изменение модели, очевидно, является следствием искажения

из-за прореживания сетки профилей, а конечная трехмерная модель в этом случае для любой ориентации отдельно получается некорректной.

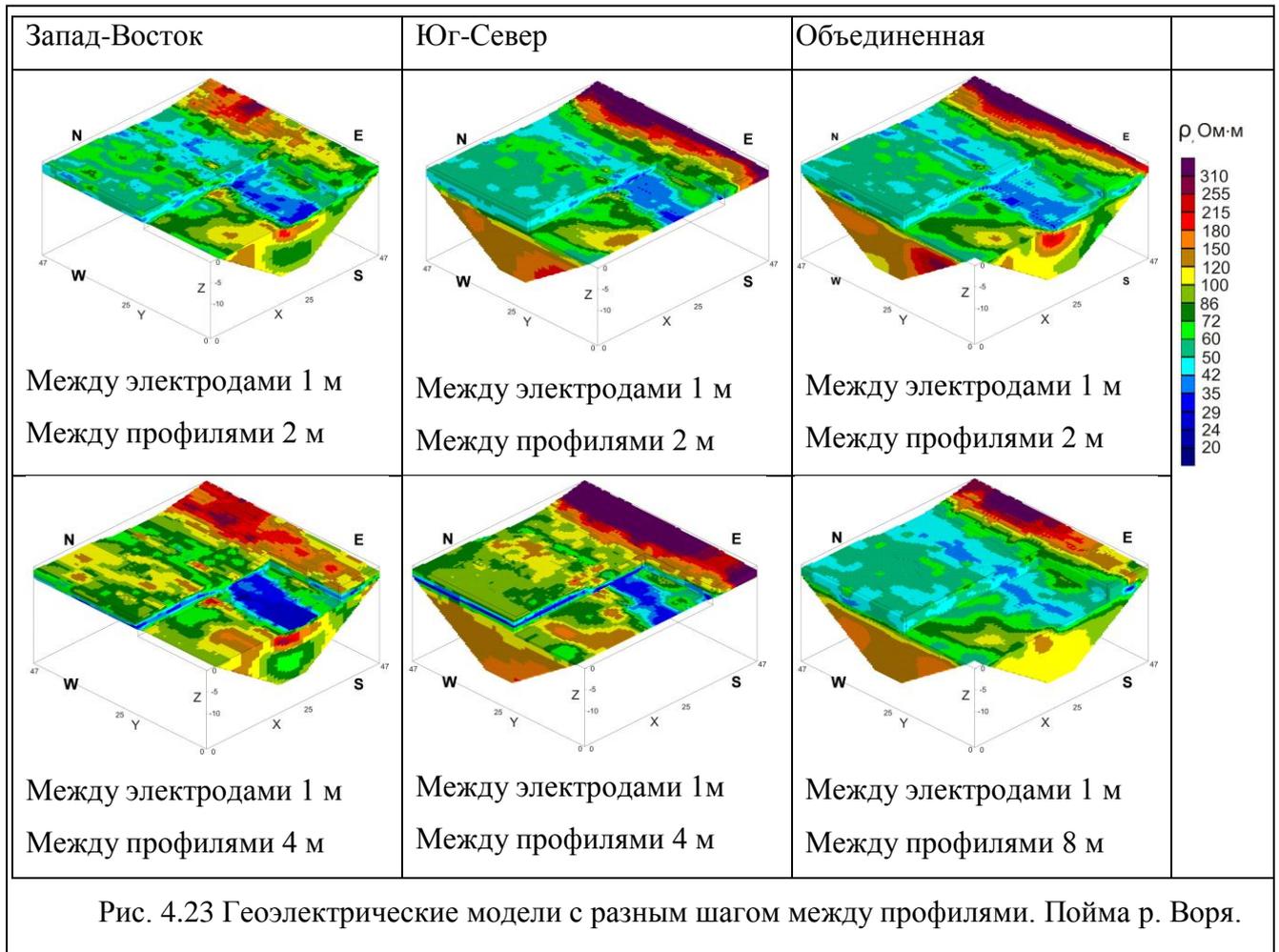


Табл. 4.6 Расширенная таблица с невязками между моделями по прореженной сети профилей. Пойма р. Воря.

Модели и шаг между профилями		Запад-Восток		Юг-Север		Объединенная	
		2 м	4 м	2 м	4 м	2 м	8 м
Запад-Восток	2 м	0%	16.8%	18.8%	26.4%	14.3%	16.4%
	4 м	-	0%	23.8%	22.1%	24.4%	26.1%
Юг-Север	2 м	-	-	0%	16.8%	14.3%	16.6%
	4 м	-	-	-	0%	25.1%	20.6%
Объединенная	2 м	-	-	-	-	0%	12.1%
	8 м	-	-	-	-	-	0%

Опыт применения псевдо-3D-съемки на пойме р. Воря также дал положительный результат: по полученным данным построены трехмерные геоэлектрическая и геологическая модели, отражающие основные неоднородности среды. Одновременно это оказался пример такой сре-

ды, для которой результат почти не зависит от азимута профилей. Кроме того, исследование позволило заключить, что для данного участка прореживание шага между профилями почти не влияет на трехмерную модель по двум ориентациям. В то же время для любого азимута отдельно увеличение шага между профилями более чем в 2 раза по сравнению с шагом между электродами может значительно исказить трехмерную модель. Резюмируя, при одинаковой производительности (здесь – по 12 профилей в каждом случае), съемка с увеличенным шагом между профилями, но с объединением данных двух направлений поляризации дает лучший результат, чем съемка по параллельным профилям только одного направления, вне зависимости от их азимута.

Шекшово

На двух экспериментальных участках на Александровском плато и на пойме р. Воря, как отмечалось выше, измерения по методике псевдо-3D-электротомографии носили методический характер. Цель исследований заключалась в разработке и оптимизации самой методики: определении ее производительности, ограничений, технических характеристик, сравнении результатов при вариации ее параметров, круга решаемых задач и конфигурации неоднородностей в изучаемых средах.

Описываемый в этом разделе пример полевых результатов носит уже производственное практическое значение и показывает, как псевдо-3D-методика позволяет решать конкретную задачу детального картирования археологических объектов.

Комплексные геофизические исследования проводились на участке вблизи с. Шекшово (Ивановская обл.). Основной задачей являлось обнаружение и картирование на исследуемой площади курганных и одиночных древнерусских захоронений XI века. На момент проведения исследований единственной информацией об объекте поиска были сведения о незначительной (до 0.5 - 1 м) мощности культурного слоя. Исследования включали в себя метод ЭП-СГ, магниторазведку, георадиолокацию, 2D-электротомографию по отдельным профилям и высокоточную тахеометрическую топографическую съемку, измерения по методике псевдо-3D-электротомографии проводились на двух основных планшетах с большим шагом между профилями (1 м между электродами, 5 м между профилями) и на двух планшетах детализации (параметры съемки в Табл. 4.7) для картирования выделенных по комплексу остальных методов аномалий (Рис. 4.24).

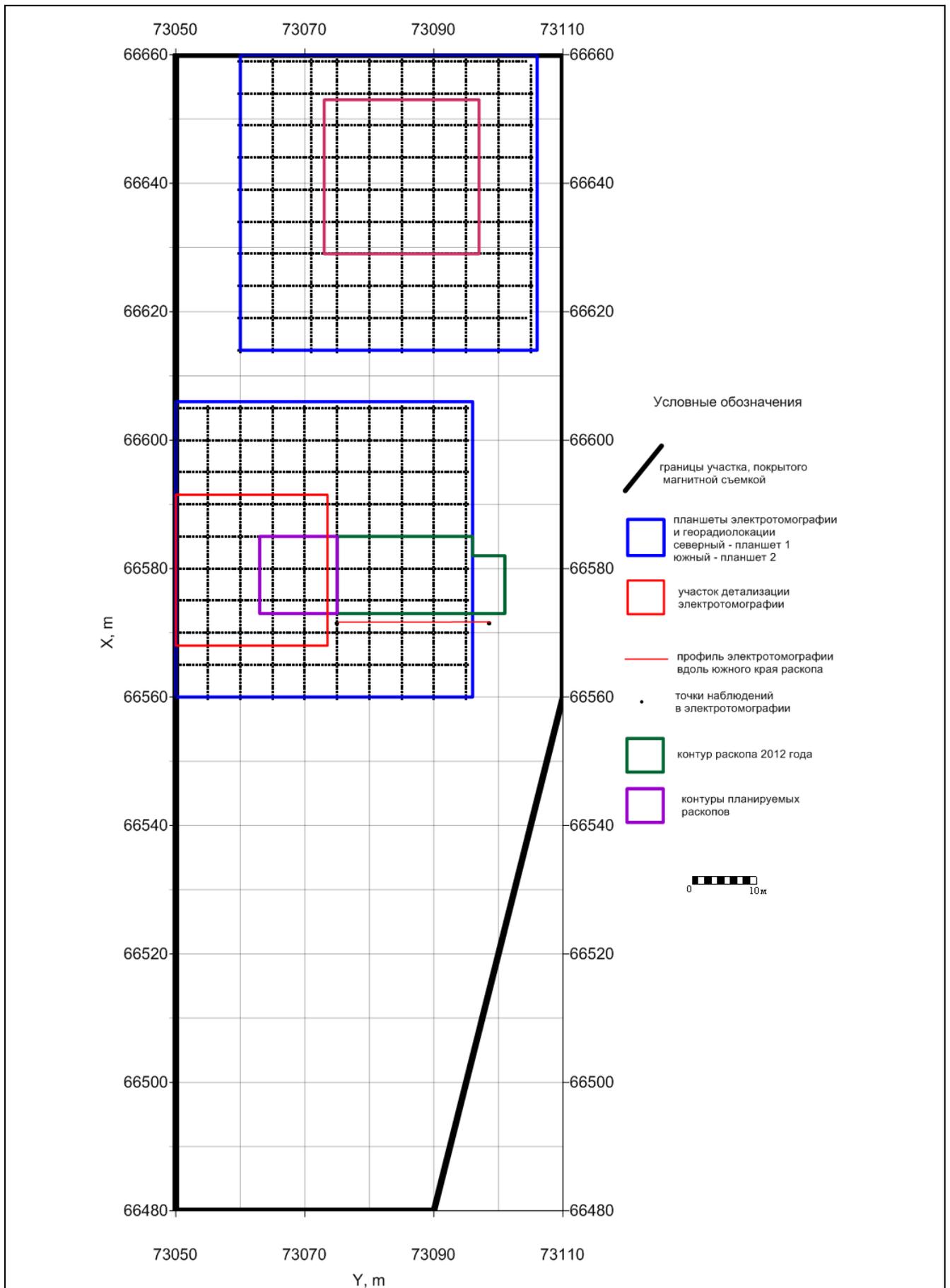
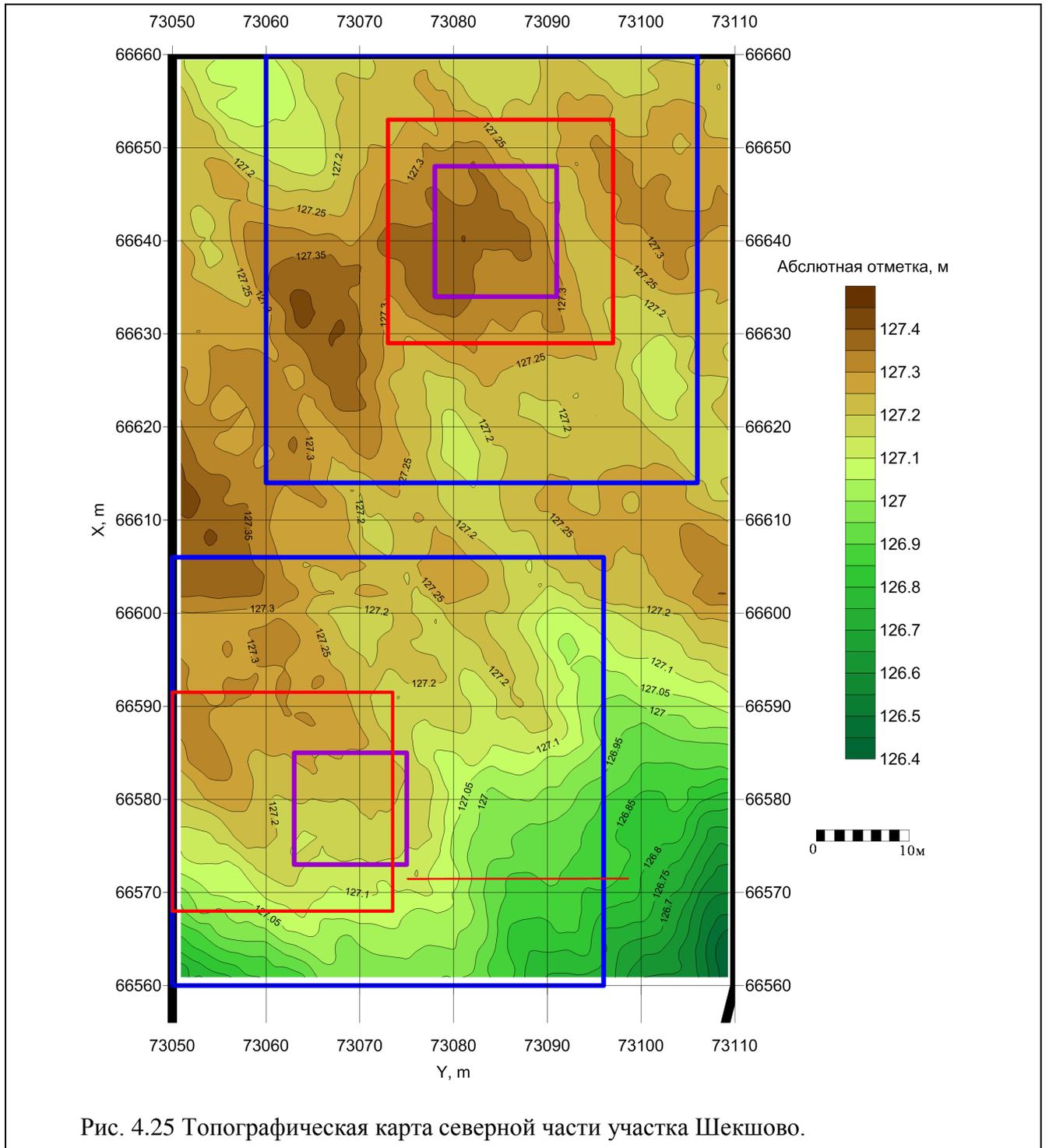


Рис. 4.24 Карта фактического материала геофизических исследований на участке ШекшОВО.

Поскольку данный раздел моей диссертационной работы посвящен псевдо-3D-съемке, для краткости далее я буду подробно рассматривать только 2 планшета детализации. А остальные результаты всего комплекса методов представлены в техническом отчете по геофизике (Отчет о результатах..., 2013).

Для характеристики рельефа на исследуемых планшетах детализации ниже приведена подробная топографическая карта (Рис. 4.25). Карта сопротивлений, построенная по результатам электротомографии с бóльшим шагом (5 м), чем при детализации, приведена для обоснования выбора положения участков детализации (Рис. 4.26).



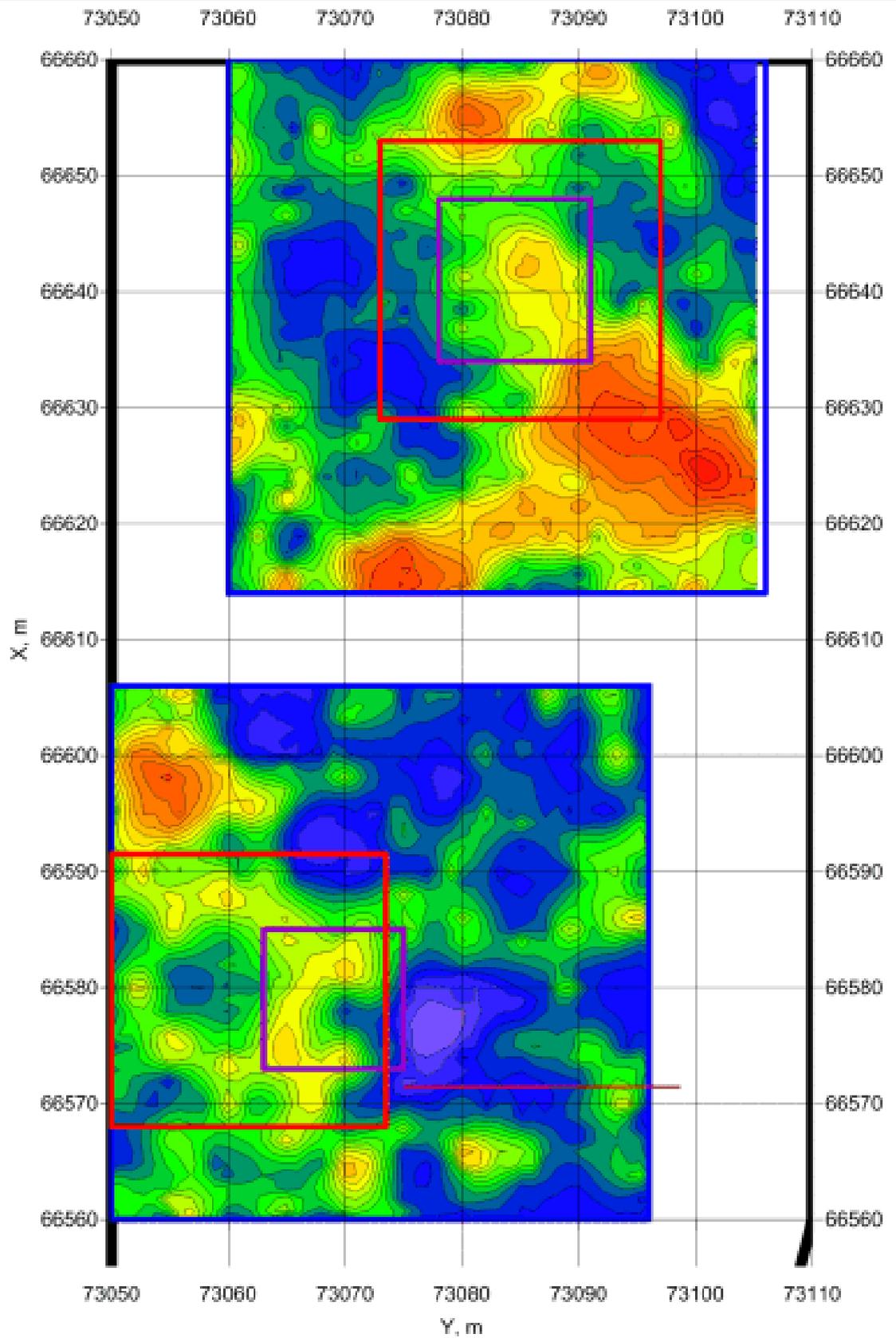


Рис. 4.26 Карта сопротивлений на глубине 0.5-0.6 м в северной части участка Шекшово.

Измерения на планшетах детализации проводились также с использованием электроразведочной станции «Омега-48». Сеть наблюдений была аналогичной измерениям на участках вблизи д. Александровка (Рис. 4.11), но с другим масштабом и шагом между электродами и профилями (Табл. 4.7).

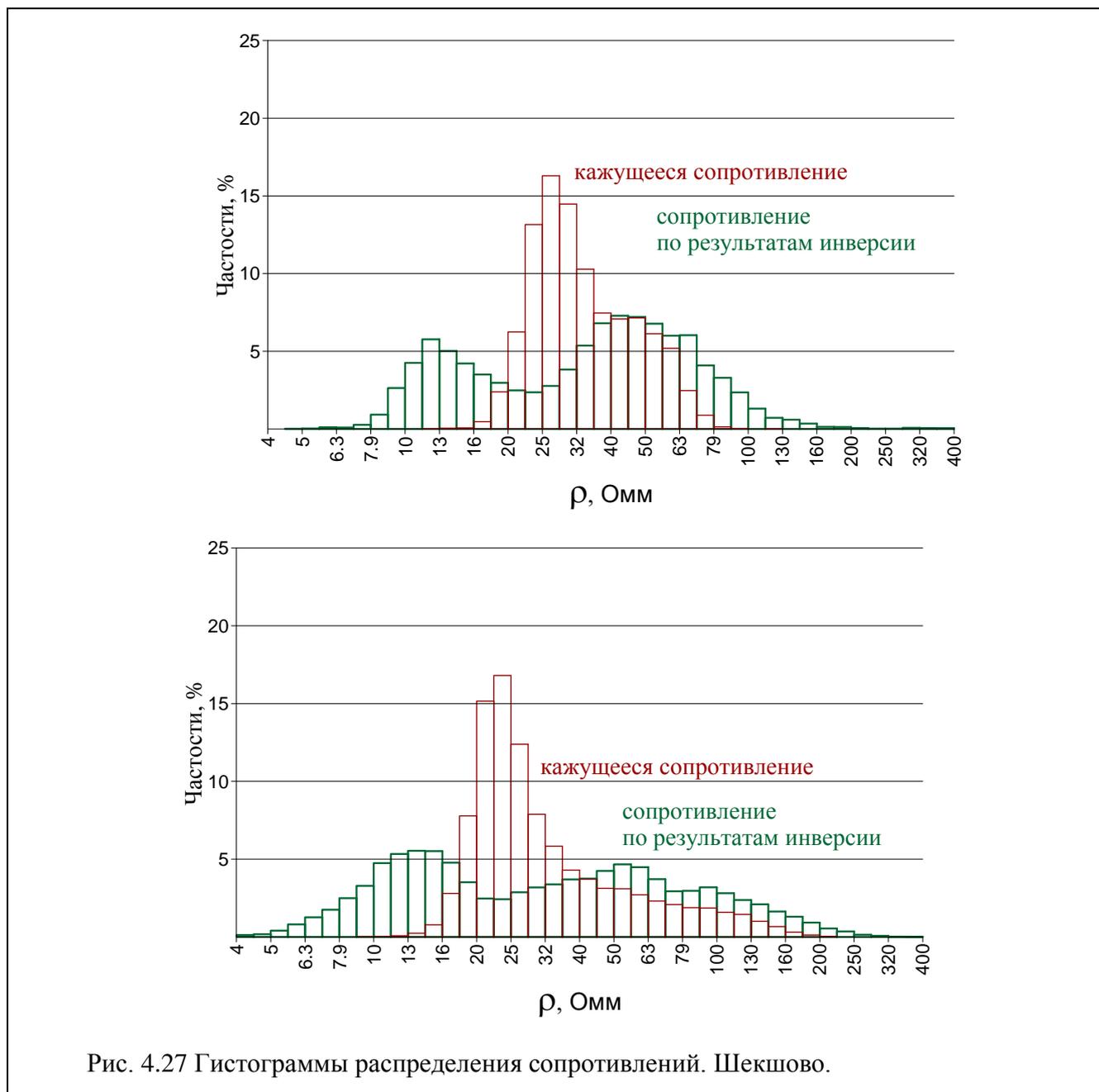
Табл. 4.7 Параметры псевдо-3D-съемки 2-х планшетов детализации. Шекшово.				
	Планшет 1 (северный)		Планшет 2 (южный)	
Шаг между электродами	0.5 м		0.5 м	
Шаг между профилями	2 м (1.5 на краю между последней парой профилей)		1 м	
Количество ориентаций	2		2	
Общее число профилей	24		48	
Размер планшета	23.5 м x 23.5 м		24 м x 24 м	
Используемые установки	Amn+mnB	ABmn	Amn+mnB	ABmn
Макс. и мин. разносы	0.75 м и 3.75 м	0.5 м и 3 м	0.75 м и 3.75 м	0.5 м и 2 м
Общее число измерений	21 309		36 348	
Плотность топосъемки	1 м x 1 м		1 м x 1 м	

В полевых работах принимали участие 4 человека. Суммарное время, затраченное на измерения на двух планшетах, составило около 12 часов. Общее рабочее время было разбито на 2 дня по 6 рабочих часов. Обработка осуществлялась с учетом топографии с одинаковыми параметрами отдельно для каждой ориентации и для объединенных данных двух ориентаций по каждому планшету.

По результатам измерений были построены гистограммы распределения кажущегося сопротивления и сопротивления, полученного по результатам инверсии (Рис. 4.27).

Участки расположены вблизи друг друга (на расстоянии около 50 м), поэтому гистограммы имеют схожее строение, особенно, в области низких сопротивлений. Согласно априорной информации целевые археологические аномалии должны иметь повышенные значения сопротивлений относительно вмещающей среды. Это подтвердилось данными комплекса геофизических методов. Поэтому на обеих гистограммах после инверсии основной пик в области низких сопротивлений с центральным значением около 10-15 Ом·м соответствует вмещающему разрезу. Литологически такие значения сопротивлений отвечают материковым глинам. В области сопротивлений выше 25 Ом·м гистограммы отличаются между собой. На Планшете 1 присутствует один ярко выраженный пик на 30-100 Ом·м с максимальным пиковым значением 7%. На Планшете 2 он несколько шире по сопротивлениям (от 30 до 200 Ом·м), менее представлен (максимально до 5%) и имеет двугорбую форму. Эта область сопротивлений на гистограммах

отвечает суглинистым отложениям культурного слоя и почвенного покрова. При этом, по-видимому, на южном планшете 2 их можно разделить по сопротивлениям (два «горба» на гистограмме), в отличие от северного планшета 1.



Для каждого планшета в результате 3D-инверсии была получена геоэлектрическая модель (Рис. 4.28, Рис. 4.30). На основе геоэлектрических моделей были построены геологические в соответствии с представлениями о строении разреза в районе работ и данными статистического анализа. Ниже представлен пример построения геологической модели для Планшета 1 (Рис. 4.27).

Геофизические результаты были практически во всем объеме подтверждены результатами последующих археологических раскопок. В качестве примера результатов сопоставления данных геофизики и археологии приведена карта сопротивлений на глубине 45 см от дневной по-

верхности с наложенным поверх нее планом зачистки по материка, на котором отражены зафиксированные раскопками одиночные захоронения. Все наиболее интересные выделенные по результатам геофизических методов аномалии нашли соответствие в археологических комплексах: на Планшете 1 основная неоднородность в виде круга приурочена к положению древнего кургана и засыпанных рвов, располагавшихся вокруг него. На Планшете 2 обнаружился ряд одиночных захоронений. Это указывает на высокую достоверность результатов, полученных по описываемой методике, при решении археологических задач по обнаружению и описанию структуры остатков курганных и одиночных древнерусских захоронений XI века при малой мощности культурного слоя (менее 1 м, около 0.5 м в среднем).

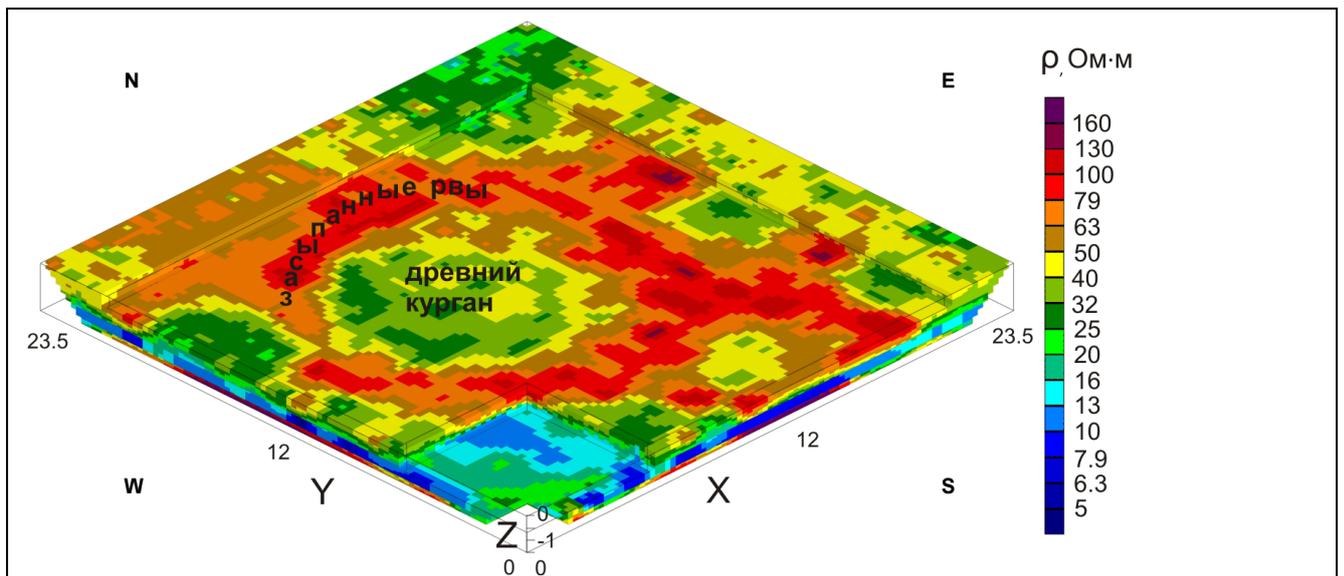


Рис. 4.28 Геоэлектрическая трехмерная модель. Шекшово, Планшет 1.

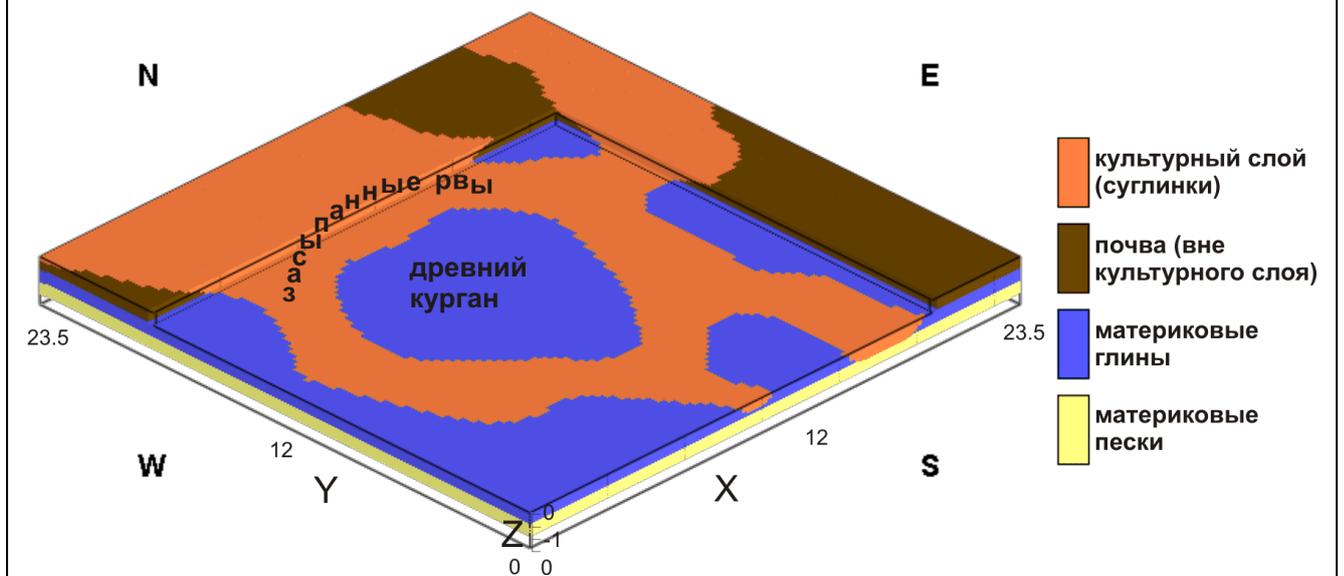


Рис. 4.29 Схематичная геологическая модель по результатам псевдо-3D-съемки. Шекшово, Планшет 1.

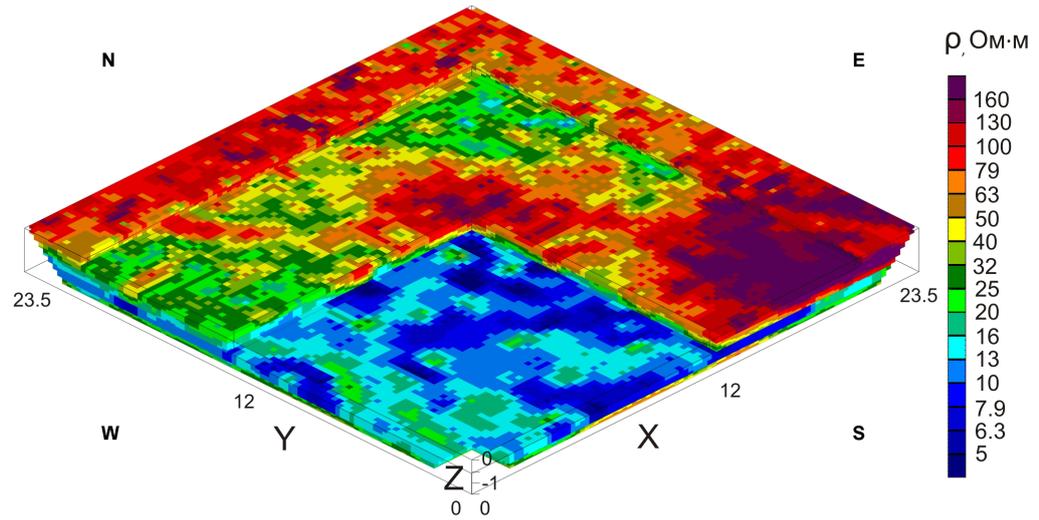


Рис. 4.30 Геоэлектрическая трехмерная модель. Шекшово, Планшет 2.

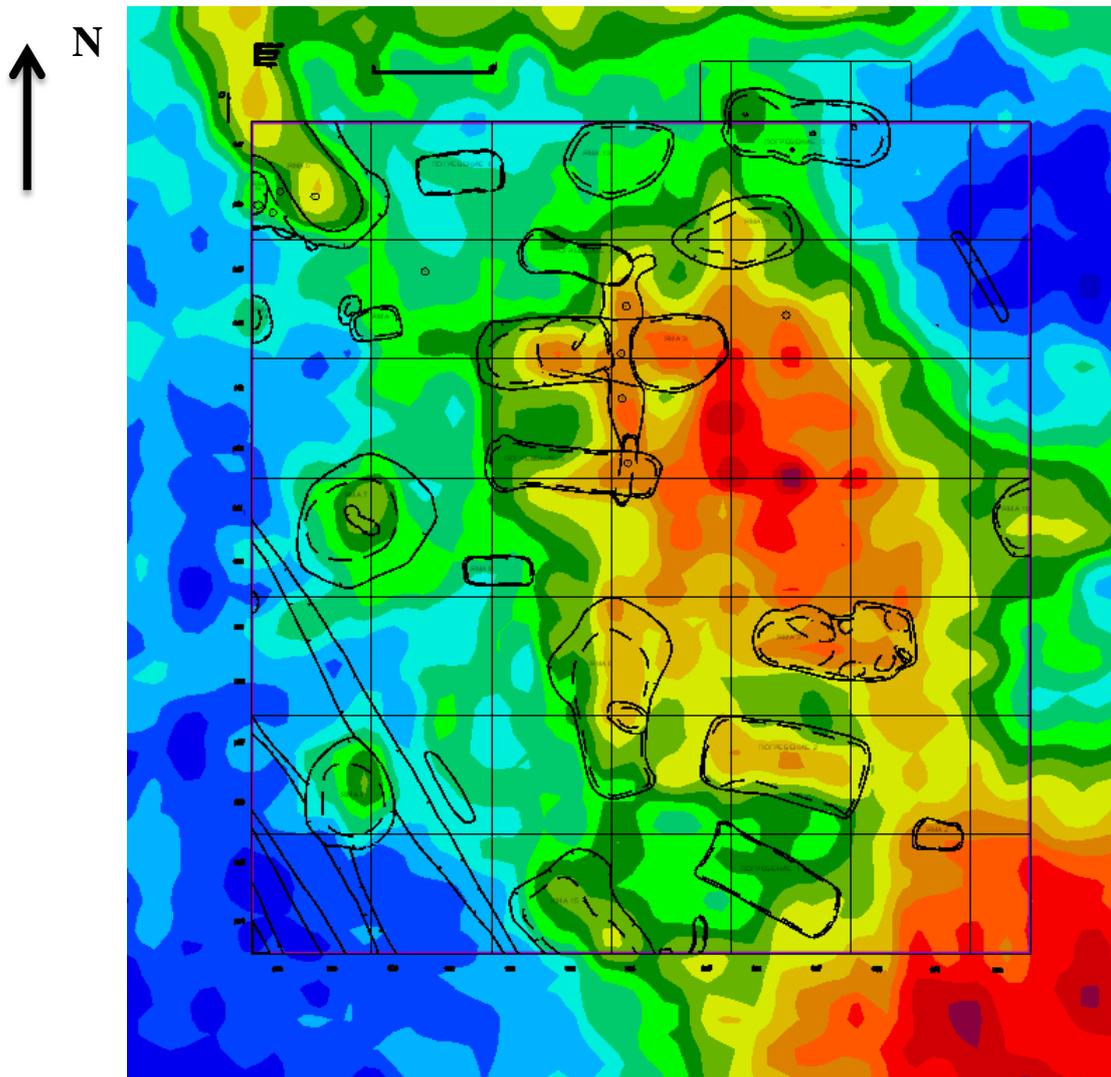


Рис. 4.31 Карта сопротивлений на глубине 45 см с наложенным поверх нее планом зачистки по матерiku (одиночные захоронения показаны сплошными контурами). Шекшово, Центральная часть Планшета 2.

6. Выводы по Главе

Моделирование измерений по методике псевдо-3D-электротомографии по одной и двум системам параллельных профилей на модели «Стены-Рвы» (а также «Стена-Ров») позволило определить чувствительность методики к линейным аномальным объектам различной ориентации и контрастности и сформулировать рекомендации по оптимальному построению сети измерений. По результатам моделирования было проведено сравнение возможностей методики псевдо-3D (частью которой является 3D-инверсия) и площадной 2D-электротомографии (с 2D-инверсией).

Для моделей любой контрастности 3D-инверсия, в целом, показывает лучшие результаты преимущественно благодаря двум основным факторам: 1) учету трехмерного строения среды при 3D-инверсии в отличие от 2D и 2) возможности 3D-инверсии работать с большим контрастом сопротивлений, чем 2D. Поэтому все модели по 3D-инверсии получаются более контрастными, чем по 2D.

Выбранная псевдо-3D-методика с 3D-инверсией обладает высокой горизонтальной разрешающей способностью и отлично справляется с плановым картированием аномального объекта. При той же системе наблюдений и методике после 2D-инверсии заданная при моделировании модель проявляется хуже, вплоть до полной невозможности восстановить форму и сопротивление объекта, поскольку возникают искажения, связанные с контрастом и глубиной нижней кромки.

При анализе результатов моделирования можно зафиксировать эффект поляризации линейных объектов, влияющий на данные даже при большом количестве положений питающих электродов на каждом профиле. Отмечена его важная особенность: при одной ориентации профилей по результатам 2D-инверсии лучше проявляется линейный объект любого контраста (и высокоомный, и проводящий), перпендикулярный направлению профилей, по результатам 3D-инверсии для высокоомного линейного объекта закономерность та же, а для проводящего объекта закономерность обратная – лучше проявляется проводящий линейный объект, параллельный профилям.

На геоэлектрических моделях присутствуют сопряженные аномалии и искажения в областях модели, где отсутствует возмущающий аномальный объект (непосредственно вблизи границ объекта и по краям модели). Их амплитуда больше на геоэлектрических моделях по результатам 3D-инверсии, вероятно, поскольку 3D-инверсия способна давать более высокую контрастность.

По статистическим параметрам 2D-инверсия показала лучшие результаты, чем 3D: модели более гладкие, менее контрастные, меньше искажений. Однако статистически при всех вы-

бранных методиках и способах обработки – и 2D-инверсии, и 3D-инверсии – для модели «Стены-Рвы» невозможно восстановление реального сопротивления аномального включения.

Получен большой опыт успешного применения псевдо-3D-электротомографии на различных объектах при решении разнонаправленных задач геоэлектрического картирования.

В полевых экспериментах выявлена зависимость результирующей трехмерной модели от ориентации системы профилей для разных моделей среды. Но характер зависимости к настоящему моменту мало изучен, и не определен априорный критерий выбора оптимальной ориентации. Поэтому при проведении работ, в которых требуется высокая детальность, целесообразнее проводить съемку в двух ориентациях, поскольку она дает более надежный результат по сравнению с одной произвольной ориентацией.

На примере участка на Александровском плато показано, что геоэлектрические модели, полученные в результате трехмерной и двумерной обработки измерений на одном и том же планшете могут иметь принципиальные с точки зрения геологической интерпретации отличия.

На примере данных по участку на пойме р. Воря показано, что при одинаковом количестве профилей съемка в двух ориентациях и с большим шагом между профилями дает лучший результат, чем съемка в одной ориентации.

Результаты псевдо-3D-съемки на двух участках в с. Шекшово выявили структурные неоднородности культурного слоя. На Планшете 1 основная неоднородность приурочена к положению древнего кургана. На Планшете 2 обнаружился ряд одиночных захоронений. Эти результаты были полностью подтверждены результатами последующих археологических раскопок. Это указывает на высокую достоверность результатов, полученных по описываемой методике, при решении археологических задач по обнаружению и описанию структуры остатков курганных и одиночных древнерусских захоронений XI века при малой мощности культурного слоя.

Также для псевдо-3D-съемки был выработан общий граф методики сбора и обработки данных, включающий следующие этапы:

1. Разбивка квадратного планшета на систему параллельных профилей или две перпендикулярные системы параллельных профилей.
2. Съемка на каждом профиле по методике традиционной 2D-электротомографии: а) в одной ориентации шаг между профилями не превышает 2 шага по профилю, б) в двух ориентациях шаг между профилями в каждой системе может варьироваться от 1 до 8 шагов по профилю.
3. Съемка рельефа по каждому профилю.
4. Первичная обработка (подготовка к трехмерной инверсии): отбраковка данных, ввод топографии по каждому профилю, объединение данных в систему.
5. 3D-инверсия.

6. Определение распределения сопротивлений и построение гистограмм, выделение геоэлектрических комплексов.
7. Построение трехмерной геоэлектрической модели. Построение срезов на требуемых глубинах, построение разрезов по требуемым линиям для интерпретации.
8. Построение геолого-геофизической модели (гидрогеологической, археологической, инженерной, литологической и т.д.).

Заключение

Основные результаты работы можно свести к следующим положениям:

1. Выявлены и описаны искажения геоэлектрического разреза, возникающие при изучении сред с трехмерными неоднородностями с помощью двумерной электротомографии по профилю. Это позволит заранее учитывать возможные искажения при двумерных исследованиях и вырабатывать способы их подавления. Показана высокая эффективность системы мониторинга плотины как трехмерной среды на основе двумерной электротомографии. Выявлены новые типы эффектов, возникающих в теле плотины при наполнении водохранилища в зоне пониженных среднегодовых температур, это позволит учитывать их возможные проявления на других гидротехнических объектах в аналогичных условиях.

2. На основе теоретических расчетов, результатов моделирования и полевых исследований показано, что при использовании 2-х перпендикулярных питающих линии в методе СГ форма и амплитуда аномалий инвариантов кажущегося сопротивления от линейных высокоомных объектов не зависит от их ориентации.

3. Разработана методика псевдо-3D-электротомографии, включающая построение сети наблюдений, граф обработки и визуализации результатов. Выработаны основные рекомендации по выбору ее параметров и описан ряд возможных ограничений. На основе результатов численного моделирования и данных полевых экспериментов показаны преимущества и недостатки использования 2-х перпендикулярных азимутов профилей при изучении сложно построенных трехмерных сред различной контрастности. Это позволит повысить точность измерений и расширить круг задач, решаемых с помощью площадных геоэлектрических наблюдений.

Результаты работы способствуют развитию методов малоглубинной электроразведки для исследования сложно построенных, трехмерно неоднородных сред, повышению точности исследований и расширению круга решаемых задач.

Для дальнейшего развития необходимо: создание и внедрение в производство высокоточной аппаратуры для геоэлектрического мониторинга; разработка специализированных многоканальных многоэлектродных электроразведочных комплексов для площадных исследований для возможности перехода к полноценным 3D-наблюдениям; создание универсальных программ численного 3D-моделирования и программ обработки, способных работать с профильными и площадными данными 2D-, 3D- и псевдо-3D-методик.

Список литературы

1. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. Пер. Лисина В.Н., Кузнецова В.М. М., Недра, (1974) 1980.
2. Блох И.М. Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Недра, 1971, 216 с.
3. Бобачёв А.А., Ерохин С.А. Результаты многолетнего применения электротомографии на Александровском геофизическом полигоне в Калужской обл. Приборы и системы разведочной геофизики, № 01 (31) / 2010.
4. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. Физика Земли, N 12, 1995, с.79-90.
5. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., Разведочная геофизика, Обзор, АОЗТ "Геоинформмарк", Выпуск 2, 1996, 50 с.
6. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Электротомография – высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе. Инженерная геология, 2007, с. 31-35.
7. Боголюбов А.Н. Электропрофилирование на постоянном токе по методу двух составляющих. Методика геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях. Тр. ПНИИИС. Т. XV(15). М., 1972, с. 3-55.
8. Боголюбов А.Н., Боголюбов Н.П., Мозганова Е.А. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. М., Стройиздат. 1984. 200 с.
9. Большаков Д.К., Козлов О.В., Модин И.Н. Возможности электротомографии для мониторинга фильтрационных процессов в теле каменно-набросной плотины во время наполнения водохранилища. VIII международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная геофизика - 2012", Москва, Россия, 2012.
10. Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. Применение методов электроразведки для обнаружения археологических объектов на Бородинском поле. V международная научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика – 2009», Геленджик, Россия, 2009, 2 с.
11. Васильев А.Г., Гатовский Ю.А., Полянский Б.В., Пекин А.А. Отчет о бурении параметрической опорной скважины № 1 п/а на территории Александровской (Калужская область) базы учебных геофизических практик геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, 2008.
12. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности. Под ред. В. А. Шевнина, И. Н. Модина. М., Руссо, 1999, 500 с.

13. Глазунов В.В. Принципы моделирования и интерпретации потенциальных геофизических полей скрытых археологических объектов. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. С-П., 1997.
14. Горбунов А.А. Интерпретация данных векторных измерений электрического поля при инженерно-геологических и геотехнических изысканиях. Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., МГУ, 2001.
15. Горбунов А.А., Бобачев А.А., Модин И.Н. Современные проблемы использования электроразведки постоянным током при изучении 3D-неоднородных сред. «Ломоносовские чтения», М., 2001, 2с.
16. Ерохин С.А., Кац М.Я., Модин И.Н., Павлова А.М. Проведение геофизических исследований на территории Семикаракорского городища. VIII международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная геофизика - 2012", Геленджик, Россия, 2012, 4 с.
17. Ерохин С.А., Комаров О.А., Модин И.Н., Новиков В.П., Павлова А.С., Паленов А.Ю. Геофизические исследования карстового провала возле деревни Красный Клин в Калужской области. VII международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная геофизика-2011", Москва, Россия, 2011, 6 с.
18. Ерохин С.А., Модин И.Н., Новиков В.П., Павлова А.М. Возможности электрической томографии при изучении карстово-суффозионных воронок. Инженерные Изыскания, 11, ПНИИИС, 2011, с.16 - 22.
19. Ерохин С.А., Модин И.Н., Павлова А.М. Паленов А.Ю., Пелевин А.А., Стойнова А.М. Пример комплексных геофизических исследований археологического объекта на Бородинском поле. Электронный журнал ГЕОразрез, 2012, №4-2012(12), www.georazrez.ru
20. Ерохин С.А., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Шевнин В.А. Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов. Инженерные изыскания, ПНИИИС, 11/2011, с. 30-34.
21. Ерохин С.А., Павлова А.М., Балашов А.Ю., Шевнин В.А., Модин И.Н., Бобачев А.А. Методические электротомографические исследования при археологических раскопках в селе Бородино. Археология Подмоскovie: Материалы научного семинара. Выпуск 8. 2012, М., Институт археологии РАН, с. 435-446.
22. Заборовский А.И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963, 424 с.
23. Жданов М.С. Электроразведка. М., Недра, 1986, 316 с.
24. Изучение анизотропии в методе сопротивлений. Учебное пособие - Тверь: Издательство Полипресс, 2012. 164 с. Под ред. проф. В.А. Шевнина. ISBN 978-5-904807-14-6

- Авторы: Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Мусатов А.А., Перваго Е.В., Шевнин В.А., Акуленко С.А. Ерохин С.А., Павлова А.М.
25. Игнатова И.Д. Электроразведка методом сопротивлений при изучении сложно-построенных сред для подземных и наземных условий. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Геол. фак. М., МГУ, 1995.
 26. Инструкция к программе IE3R1. МГУ, 1991.
 27. Инструкция к программе IPI2WIN, <http://www.geoelectric.ru/>
 28. Инструкция по выполнению работ методом наземной двумерной электротомографии с аппаратурой «Омега-48». А.А. Бобачев, М.Н. Марченко и др. Под ред. И.Н. Модина и В.А. Шевнина. ООО «НПЦ Геоскан» ООО «Логис», 2010, 58 с.
 29. Информационное Заключение о состоянии гидротехнических сооружений Богучанской ГЭС по результатам оперативного анализа результатов натуральных наблюдений на 04.10.2012., БЕМО «Богучанская ГЭС», Кодинск, 2012.
 30. Каминский А.Е. Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) ZONDRES2D. Zond Geophysical software. 2001-2010. 81 с.
 31. Каминский А.Е. Программа трехмерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) ZONDRES3D. 2001-2010, Zond Geophysical software, 75 с. <http://zond-geo.ru>.
 32. Козлов О.В., Павлова А.М. Геоэлектрический мониторинг каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС методом электротомографии. Инженерные изыскания, ПНИИИС, 12/2013, с. 40-47.
 33. Козлов О.В., Павлова А.М. Учёт влияния поперечного рельефа плотин на данные профильных геоэлектрических наблюдений. Тезисы и материалы X Международной научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика – 2014», Геленджик., Россия, 2014, 6 с.
 34. Козлов О.В., Павлова А.М. Электротомография при геоэлектрическом мониторинге плотины Богучанской ГЭС. IX международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика – 2013», Геленджик., Россия, 2013, 9 с.
 35. Козлова Е.А. Решение прямой задачи методом двойного электрического слоя. 2010, магистерская диссертация, руководитель – доц. Бобачёв А.А., 41 с.
 36. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М. Научный мир, 2007, 248 с.
 37. Кусков В.В. К вопросу об искажениях кривых ВЭЗ в условиях негоризонтальных границ раздела. Вестник МГУ, 1979, Сер. Геол., N5, с. 68-72.

38. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. М., Недра, 1984, 270 с.
39. Куэвас Кастельянос П., Кривошея К.В., Шевнин В.А., Павлова А.М., Рыжов А.А., Бобачев А.А. Моделирование проявления карстово-суффозионных провалов методом сопротивлений. IX международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика – 2013», Геленджик., Россия, 2013, 8 с.
40. Лаврушин Ю.А. Отчет о результатах изучения строения четвертичных отложений в районе учебно-методического геофизического полигона Александровка. 1997, М., 39 с.
41. Модин И.Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике. Дисс. д-ра техн. наук, М., МГУ, 2010.
42. Модин И.Н., Ерохин С.А., Павлова А.М., Пелевин А.А., Шишкина Т.В. Изучение древнерусских курганов с помощью трёхмерной электрической томографии и георадиолокации. Тезисы и материалы X Международной научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика – 2014», Геленджик, Россия, 2014, 4 с.
43. Модин И.Н., Бобачев А.А., Владов М.Л., Горбунов А.А., Золотая Л.А., Коснырева, Иванова С.В., Кузнецов С.В. и др. Картирование оснований стен деревянного дворца царя Алексея Михайловича с помощью геофизических методов. III международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика - 2006», Геленджик, Россия, 2006, с. 58-60.
44. Никитин А.А. Использование статистической теории обнаружения сигналов для выделения слабых геофизических аномалий. Изв. вузов, Геология и разведка, 1977, № 6, с. 77-87.
45. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М., Недра, 1986.
46. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. Учебное пособие, М., ООО «Центр информационных технологий в природопользовании, 2008, 114 с.
47. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. Изд. 2-е, испр., М., Техносфера, 2007, 856 с.
48. Отчет о результатах работ «Геофизические исследования на участке Шехшово». 2013, ООО «НПЦ Геоскан», Москва.
49. Павлова А.М. Проблемы изучения сложно построенных сред методом сопротивлений. 2011, магистерская диссертация, руководитель - проф. Шевнин В.А., 58 с.
50. Павлова А.М. Результаты 3D-электротомографии при исследованиях ледниковых отложений Александровского плато. Электронное научное издание ГЕОразрез, 2013, №1-2013(13), www.georazrez.ru

51. Павлова А.М. Электроразведка в археологии: выделение аномалий с использованием пространственных инвариантов тензора кажущегося сопротивления. Электронное научное издание ГЕОразрез, 2009, № 2-2009(4), www.georazrez.ru
52. Павлова А.М. Электроразведка в археологии: выделение слабых аномалий на картах ЭП-СГ вблизи Бородино с использованием пространственных инвариантов тензора сопротивлений. Тезисы и материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2009», Москва, Россия, 2009, 1 с.
53. Павлова А.М. Электроразведка в археологии: методы выделения слабых аномалий с использованием пространственных инвариантов тензора сопротивлений. 2009, бакалаврская диссертация, руководитель – проф. Шевнин В.А., 24 с.
54. Павлова А.М. Электроразведка в археологии: методы выделения слабых аномалий с использованием пространственных инвариантов тензора сопротивлений на примере объекта Бородино. Тезисы и материалы молодёжной конференции «Планета Земля-2009», Москва, Россия, 2009, 4 с.
55. Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений. Геофизика, ЕАГО, №6.2013, 2013, с. 32-37.
56. Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследованиях ледниковых отложений. IX международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная геофизика - 2013", Геленджик, Россия, 2013, 7 стр.
57. Перваго Е.В. Влияние анизотропии и неоднородностей на результаты электрических зондирований. Дисс. на соиск. ст. к. ф.-м. н. М., МГУ, 1998, 83 с.
58. Светов Б.С., Пискун П.В. Спектрально-пространственный анализ (СПАН) электроразведочных данных. Журнал «Геофизика», 4, 2005, М., Издательство ГЕРС, 43 с.
59. Семенов А.С. Анизотропия горных пород и особенности электрических полей в анизотропных средах. Вестник ЛГУ, серия «Геология, география», 1975, N 24, с. 40-47.
60. Смирнова Т.Ю. Математическое моделирование сложно-построенных сред в электроразведке методом сопротивлений. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М., 1994.
61. Смутьский П.Я. Богучанская плотина на р. Ангаре, сборник Геология и плотины XII, Энергоатомиздат, М., 1992.
62. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований». Госстрой России. – М.: ПНИИИС Госстроя России, 2004. 49 с.

63. Станюкович А.К. Скрытые объекты историко-культурного наследия. Принципы выявления и изучения методами археологической геофизики. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора исторических наук. М., 1994.
64. Технический отчёт о результатах геоэлектрического контроля КНП Богучанской ГЭС при отметке уровня верхнего бьефа водохранилища 188 м. 2013, ЦСГНЭО, Гидропроект, Москва.
65. Технический отчёт о результатах геоэлектрического контроля КНП в период первого наполнения водохранилища. 2012, ЦСГНЭО, Гидропроект, Москва.
66. Франтов Г. С., Пинкевич А. А. Геофизика в археологии. Ленинград, Недра, 1966, 212 с.
67. Хмелевской В.К. Электроразведка. М., 1984, 420 с.
68. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Павлова А.М., Ялов Т.В. Изучение слабой анизотропии рыхлых отложений палеодолины в Александровке методами электроразведки. IX международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика – 2013», Геленджик, Россия, 2013, 6 с.
69. Шевнин В.А., Ерохин С.А., Павлова А.М. Изучение анизотропии гидравлической проводимости с помощью азимутальных измерений в методе естественного поля. VIII международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная геофизика - 2012", Геленджик, Россия, 2012, 8 с.
70. Шевнин В.А., Ерохин С.А., Павлова А.М. Изучение анизотропии с помощью азимутальных измерений в методе естественного поля. "Записки Горного института", т.200, 2013, с.108-113.
71. Шевнин В.А., Павлова А.М. Модель вертикального контакта в учебном процессе по электроразведке. Тезисы и материалы 6-ой Международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2010», Геленджик, 2010, 4 с.
72. Электрическое зондирование геологической среды. Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. Ч.1: Прямые задачи и методика работ. М., МГУ, 1988, 176 с.
73. Электрическое зондирование геологической среды. Под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. Ч. 2: Интерпретация и практическое применение. М., МГУ, 1992, 196 с.
74. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М., МГУ, 1994, 160 с.
75. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. М.: 2005. 311 с.
76. Bibby Н.М. Analysis of multiple-source bipole-quadrupole resistivity surveys using the apparent resistivity tensor. *Geophysics*, **51**, 1986, p. 972–983.
77. Bibby Н.М. The apparent resistivity tensor. *Geophysics*, **42**, 1977, p. 1258–1261.

78. Boleve A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J.L., Fry J.-J. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. *Near Surface Geophysics*, 2009, Vol.7, p. 447-462.
79. Bolshakov, D.K., Modin, I.N., Pervago, E.V., Shevnin, V.A., 1998. New step in anisotropy studies: arrow-type array. *Procs. Near Surface 1998 – 4th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Barcelona, Spain, September 1998.
80. Chambers J.E., Wilkinson P.B., Hameed A., Hill I.A., Jeffrey C.A., Wardrop D., Meldrum P.I., Kuras O., Ogilvy R.D., Gunn D., Cave M., Aumonier J. Bedrock detection and mineral thickness assessment using 3D electrical resistivity tomography (ERT). *Procs. Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Leicester, UK, 12-14 September 2011.
81. Chambers J.E., Wilkinson P.B., Weller A.L., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., Aumonier J., Penn S., Wardrop D.R, Bailey E., Joel P., Griffiths N. Sand and gravel deposit evaluation using electrical resistivity tomography. *Procs. Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009.
82. Chavez-Hernandez G., Tejero A., Alcantara M.A., Chavez R.E. The 'L-array', a 3D tool to characterize a fracture pattern in an urban zone. *Procs. Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Leicester, UK, 12-14 September 2011.
83. Compare V., Cozzolino M., Mauriello P., Patella D. Three-dimensional resistivity probability tomography at the Prehistoric Site of Grotta Reali (Molise, Italy). *Archaeological Prospection*, 16, 2009, p. 53–63.
84. Cosentino P.L., Casas A., Capizzi P., Diaz Y., Fiandaca G., Garcia E., Himi M., Martorana R., Sala R. Integrated geophysical surveys in the Tarragona Cathedral. *Procs. Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009.
85. Cosentino P.L., Capizzi P., Fiandaca G., Martorana R., Messina P., Amoroz I.R. Integrated full 3D Geoelectrical and GPR tomographies in the ambulatory of the Roman "Villa Del Casale", Piazza Armerina. *Procs. Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, Poland, 15 - 17 September 2008.
86. Cosentino P.L., Fiandaca, G. The new "Maximum Yield Grid" (MYG) Array in Full 3D Resistivity Tomography. *Procs. Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, Poland, 15 - 17 September 2008.

87. Cosentino P.L., Fiandaca G., Martorana R., Messina P. 3D ERT for the study of an Ancient wall covered by precious mosaics. *Procs. Near Surface 2009 – 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Dublin, Ireland, 7 - 9 September 2009.
88. Cuevas Castellanos P., Shevnin V.A., Krivosheya K.V., Pavlova A.M., Ryjov A.A., Bobachev A.A. resistivity modeling of sinkholes effects caused by karst and suffosion. *Procs. Near Surface 2013 – 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Bochum, Germany, 8 – 11 September 2013.
89. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, 14, p. 275–283.
90. Dahlin T., Bernstone C. A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays. *Procs. SAGEEP'97*, Reno, Nevada, 1997, 2, p. 927-935.
91. Dahlin T., Loke M.H. Quasi-3D resistivity imaging - mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. *Procs. Near Surface 1997 – 3th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Aarhus, Denmark, 1997.
92. Dahlin T., Sjö Dahl P., Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data. *Near Surface Geophysics*, 2009, Vol.7, p. 463-474.
93. Dahlin T., Wisén R., Zhang D. 3D effects on 2D resistivity imaging – modelling and field surveying results. *Procs. Near Surface 2007 – 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Istanbul, Turkey, 3–5 September 2007.
94. Dahlin T., Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52, p. 379–398.
95. Dahlin T., Zhou B. Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 2006, p. 113-123.
96. Di Fiore B., Mauriello P., Monna D., Patella D. Examples of application of tensorial resistivity probability tomography to architectonic and archaeological targets. *Annals of Geophysics*, **45**, 2002, p. 417–429.
97. Drahor M.G., Göktürkler G., Berge M.A., Kurtulmus T.Ö., Tuna N. 3D resistivity imaging from an archaeological site in south-western Anatolia, Turkey: a case study. *Near Surface Geophysics*, 2007, p. 195-201.
98. Ekinci Y. L., Kaya M. A. 3D resistivity imaging of buried tombs at the Parion necropolis (NW Turkey). *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2007, 10 (2): 1-8.
99. Erokhin S.A., Modin I., Pavlova A., Kats M. Geophysical investigations of early middle-ages turkic fortresses. *Procs. Near Surface 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Paris, France, 3 – 5 September 2012.

100. Gunther T., Rucker C. Boundless Electrical Resistivity Tomography BERT - the user tutorial. 2011, 28 pp. <http://www.resistivity.net>In-Ky Cho, Ik-Soo Ha, Ki-Seog Kim, Hee-Yoon Ahn, Seunghee Lee, Hye-Jin Kang. 3D effects on 2D resistivity monitoring in earth-fill dams. *Near Surface Geophysics*, 2014, Vol.12, No 1, p.73-81.
101. Johansson B., Jones S., Dahlin T., Flyhammar P. Comparisons of 2D and 3D inverted resistivity data as well as of resistivity and ip surveys on a landfill. *Procs. Near Surface 2007 – 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Turkey, 3–5 September 2007.*
102. Lines L.R., Treitel S. Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 1984, p. 159-186.
103. Loke M.H. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, Tutorial: *Geoelectrical Imaging 2-D and 3-D, 1996-2009*, www.geoelectrical.com
104. Loke M.H. Rapid 3-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method, Tutorial: *Geoelectrical Imaging 2-D and 3-D, 1996-2009*, www.geoelectrical.com
105. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 1996, p. 499-523.
106. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44, p. 131-152.
107. Loke M.H., Lane J.W. The use of constraints in 2D and 3D resistivity modeling. *Procs. 8th EEGS-ES Meeting, Portugal, September 2002*, 4 p.
108. Mauriello P., Monna D., Patella D. 3D geoelectric tomography and archaeological applications. *Geophysical Prospecting*, Vol. 46, N 5, 1998, p. 543–570.
109. Modin I. N., Shevnin V. A., Pervago E. V., Ignatova I. D. Vector measurements in resistivity prospecting. Report presented at EAEG 56th Annual Meeting, Vienna, Austria, 1994, 2 pp.
110. Morelli A., Morelli G., Chiara P., Pacchini A., Fischanger F. Characterization of complex archaeological sites using 3D electrical resistivity tomography. *17th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2004, 8 p.
111. Myeong-Jong Yi, Jung-Ho Kim, Yoonho Song, Seung-Hwan Chung. Application of three-dimensional resistivity imaging technique to the site investigations. *15th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2002, 15 p.
112. Neyamadpour A., Abdullah W., Taib S. Inversion of quasi-3D DC resistivity imaging data using artificial neural networks. *J. Earth Syst. Sci.* 119, No. 1, Feb. 2010, p. 27–40.
113. Nimmer R.E., Osiensky J.L., Binley A.M., Williams B.C. Three-dimensional effects causing artifacts in two-dimensional, cross-borehole, electrical imaging. *Journal of Hydrology*, 359, 2008, p. 59–70.

114. Orellana E., *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Biblioteca Tecnica Philips, Paraninfo, Madrid, 1972, 523 pp.
115. Papadopoulos N.G., Tsourlos P., Papazachos C., Tsokas G.N., Sarris A., Kim J.H. An algorithm for fast 3D inversion of surface electrical resistivity tomography data: application on imaging buried antiquities. *Geophysical Prospecting*, 59, 2011, p. 557-575.
116. Papadopoulos N.G., Tsourlos P., Tsokas G.N., Sarris A. efficient ERT measuring and inversion strategies for 3D imaging of buried antiquities. *Near Surface Geophysics*, 2007, p. 349-361.
117. Park S.K., Van G.P. Inversions of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics* 56, 1991, p. 951-960.
118. Pavlova A.M., Shevnin V.A. 3D electrical resistivity tomography in glacial sediments' research. *Procs. Near Surface 2013 – 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Bochum, Germany, 8 – 11 September 2013.
119. Petrick Wm.R.Jr., Sill Wm.R., Ward S.H. Three dimensional resistivity inversion using alpha centers. *Geophysics*, 1981, 46, p. 1148-1163. White R.M.S., Collins S., Loke M.H. Resistivity and IP arrays, optimised for data collection and inversion. *Exploration Geophysics*, 2003, 34, p. 229–232.
120. Pidlisecky A., Knight R. 2008. FW2_5D: A MATLAB 2.5-D electrical resistivity modeling code. *Computers and Geosciences*, 34, p. 1645–1654.
121. Pidlisecky A., Haber E., Knight R. 2007. RESINVM3D: A MATLAB 3-D resistivity inversion package. *Geophysics* 72, H1–H10.
122. Ritz M., Robain H., Pervago E., Albouy Y., Camerlynck Ch., Descloitres M. and Mariko A. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon". *Geophysical Prospecting*, 1999, 47, pp.
123. Schlumberger C., Schlumberger M., Leonardon E.G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation: *Trans. AIME*, 1934, v. 110, p. 159-182.
124. Shevnin V.A., Erokhin S.A., Pavlova A.M. Anisotropy of hydraulic conductivity investigations with azimuthal self potential measurements. *Procs. Near Surface 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Paris, France. 3 – 5 September 2012.
125. Simon A. *Theory of potential mapping and its processing methods*. Report of the Eötvös Loránd Geophysical Institute, Budapest (in Hungarian), 1974.

126. Sjödahl P. Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams. 2006, Doctoral Thesis, ISRN LUTVDG/TVTG—1017-SE, ISBN 978-91-973406-5-6, Lund University, Lund, 86 p.
127. Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S., Loke M.H. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 65 (3-4), p. 155-164.
128. Szalai S., Novák A., Varga M., Szarka L. Practical Results of a Research Project. *Procs. Near Surface 2011 – 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Leicester, UK, 12-14 September 2011, 6 p.
129. Turcotte D.L. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. 2-nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997, 398 p.
130. Varga M., Novák A. and Szarka L. Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection. *Near Surface Geophysics*, 2008, 39-47. Применение тензорного метода электрического сопротивления при площадной съемке СГ в археологических изысканиях (перевод Павловой А.М.).
131. Vickery A., Hobbs B. The effect of subsurface pipes on apparent-resistivity measurements. *Geophysical Prospecting* 50, 2002 , p. 1-13.
132. Watson K., Barker R. Tank modelling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden. *Near Surface Geophysics*, 2010, 8, p. 297-309.
133. Wishart D., Slater L., Alexander G. Fracture anisotropy characterization in crystalline bedrock using field-scale azimuthal self potential gradient. *Journal of Hydrology*, 2008, 358, p. 35– 45.
134. Wishart D., Slater L., Alexander G. Self potential improves characterization of hydraulically-active fractures from azimuthal geoelectrical measurements. *Geophysical research letters*, Vol. 33, L17314, doi:10.1029/2006GL027092, 2006.
135. Yang X., Lagmanson M. Comparison of 2D and 3D electrical resistivity imaging methods. *SAGEEP proceedings*, 2006, p. 585-594.