

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет"

На правах рукописи

ЛАЛОМОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ



**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И
ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА
ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

**Специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент
Глазунов Владимир Васильевич

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И ПРЕДПОСЫЛКИ ИХ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ	10
1.1 Инженерно-геологические задачи на объектах транспортного строительства	10
1.2 Решение инженерно-геологических задач на основе комплексирования геофизических методов	12
1.3 Методы электротомографии и георадиолокации и их теоретические основы	14
Выводы к главе 1	27
ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСИРОВАНИЮ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ	28
2.1 Анализ достоинств и недостатков методов георадиолокации и электротомографии	28
2.2 Электро-георадиолокационные синтетические 1 D модели элементарных сред	32
2.3 Электро-георадиолокационные синтетические 2 D модели геологических сред	36
2.4 Электро-георадиолокационные натуральные 2 D модели геологических сред	45
2.5 Эквивалентность моделей структуры волнового электромагнитного поля	53
Выводы к главе 2	55
ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ РАЗРЕЗОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ	57
3.1 Петрофизическая модель песчано-глинистого грунта	57
3.2 Оценка коэффициента фильтрации на основе электрофизических параметров	59
3.3 Определение влияния минерализации на параметр добротности	70
3.4 Определение диэлектрической проницаемости матрицы грунта	90
Выводы к главе 3	94
ГЛАВА 4 РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА	96
4.1 Исследование песчано-глинистых разрезов оснований инженерных сооружений	96
4.2 Исследование песчано-глинистых разрезов мерзлых насыпных грунтов	106
4.3 Исследование дорожной одежды и земляного полотна	126
4.4 Исследование фильтрационных свойств дренирующих слоев дорожной одежды	139
4.5 Обоснование экономической эффективности геофизического комплекса	151
Выводы к главе 4	166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

В связи с постоянно растущими требованиями к качеству и надежности инженерных сооружений ни один из крупных строительных проектов не обходится без комплексных геофизических исследований, которые являются самостоятельным видом работ, и выполняются в сочетании с другими видами инженерно-геологических изысканий, тем самым являясь их неотъемлемой частью.

Обладая рядом особенностей, связанных со скоростью выполнения, возможностью дистанционных и неразрушающих исследований, высокой разрешающей способностью, сравнительно небольшой стоимостью, особую актуальность геофизические исследования приобретают при реализации линейных объектов транспортного строительства на всех стадиях, начиная от проектирования и заканчивая их эксплуатацией. За последние десятилетия широкое распространение и заслуженное признание в строительной отрасли получили электромагнитные методы геофизических исследований в различных модификациях. Наиболее востребованными среди них являются методы георадиолокации (ГРЛ) и электротомографии (ЭТ). Количество публикаций за последние 15-20 лет, посвященных теоретическим разработкам и практическому применению этих методов, может поразить даже самое искушенное воображение. Зарубежные и отечественные журналы *Near Surface Geophysics*, *Journal of Applied Geophysics*, *Geophysical Prospecting*, *Геофизика*, *Инженерные изыскания*, *Разведка и охрана недр* и многие другие ежегодно публикуют десятки научных и прикладных трудов по данному направлению. В то же время, развитие методов ГРЛ и ЭТ достигло своей кульминации уже в конце прошлого столетия и связано с такими именами отечественных и зарубежных ученых, как М.Л. Владов, В.В. Глазунов, Н.Н. Ефимова, А.В. Калинин, В.В. Капустин, А.М. Кулижников, Н.П. Семейкин, А.В. Старовойтов, М.И. Финкельштейн, А.А. Бобачев, И.Н. Модин, В.А. Шевнин, А.Е. Каминский, A.P. Annan, J.L. Davis, J.D. Daniels, M. Bano, M.H. Loke, R.D. Barker, T. Dahlin, B. Zhou и многими другими. На сегодняшний же день, судя по многочисленным публикациям, происходит только усложнение аппаратной и методической базы каждого из методов, зачастую, без видимого прогресса в решении каких-либо новых прикладных задач. Между тем, комплексирование геофизических методов остается сильным приемом, позволяющим повысить качество, эффективность, производительность, а самое главное – достоверность монометодных геофизических данных на основе их совокупного анализа, обработки и интерпретации. Не является исключением и комплекс методов ГРЛ и ЭТ, по существу имеющих общие электрофизические основы. Каждый из методов, обладая своими ограничениями, достоинствами

и недостатками, при совместном рассмотрении способен дополнять геофизический комплекс, тем самым получить рациональное решение прикладной задачи на основе интеграции тех или иных преимуществ в целостную геолого-геофизическую интерпретационную модель, являющуюся результатом геофизических исследований. Но несмотря на очевидные преимущества комплексирования методов ГРЛ и ЭТ в настоящий момент данный вопрос проработан недостаточно. Существует ряд работ по теоретическому обоснованию (Глазунов В.В. и др., 2002; Glazounov V.V. et. al., 2003; Giroux B. and Chouteau M., 2010; Wunderlich T and Rabbel W, 2013) и практическому использованию (Khalil M.A. et. al 2010; Pascale G.P. et al., 2008; Donohue S. et al., 2013) метода ГРЛ с элементами метода сопротивлений, модификацией которого является ЭТ. Внимательное рассмотрение идей, предложенных в данных работах, сулит большие перспективы комплексу ГРЛ и ЭТ при решении инженерно-геологических задач не только на качественном, но и на количественном уровне интерпретации геофизических данных. Но для этого возникает настоятельная необходимость критического осмысления, систематизации фактического материала, касающегося методов ГРЛ и ЭТ, и разработки системного подхода к их комплексированию, результаты которого будут отвечать современным требованиям отрасли инженерно-геологических изысканий.

Цель работы

Цель работы заключается в повышении однозначности и информативности инженерно-геофизических исследований методами георадиолокации и электротомографии за счет сужения действия принципа эквивалентности, повышения детальности исследований, определения дополнительных петрофизических и геометрических параметров разреза, изучаемых в рамках инженерных изысканий линейных объектов транспортного строительства.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Проанализировать достоинства и недостатки методов ГРЛ и ЭТ и на синтетических и полевых данных, обосновать возможность и необходимость их комплексирования. Выполнить анализ пространственной корреляции между строением и свойствами геоэлектрических и георадиолокационных разрезов.
2. Установить ряд петрофизических параметров, определение которых возможно на основе данных комплексного применения методов ГРЛ и ЭТ. Определить характер зависимости параметра добротности, определяемого по данным георадиолокации, от минерализации поровой влаги.

3. Разработать и обосновать оценку глинистости песчано-глинистых грунтов с последующим прогнозом их фильтрационных свойств на основе комплексных георадиолокационных и электротомографических данных.

4. Доказать на практических примерах производственную и экономическую эффективность комплекса электротомографии и георадиолокации при решении инженерно-геологических задач на линейных объектах транспортного строительства.

Положения, выносимые на защиту

1. Методический подход, основанный на комплексировании данных георадиолокации и электротомографии с целью построения согласованной георадиолокационно-электротомографической модели исследуемой среды, повышает достоверность геологической интерпретации результатов инженерно-геофизических исследований, обеспечивая сужение границ действия принципа эквивалентности при определении геометрических параметров и электрофизических свойств геологического разреза.

2. На основе определения георадиолокационного параметра добротности и синтеза комплексной георадиолокационно-геоэлектрической модели реализуется оценка содержания глинистых частиц и фильтрационных свойств песчано-глинистых грунтов.

3. Комплексное применение методов георадиолокации и электротомографии обеспечивает детальное изучение геологического строения и состояния песчано-глинистых разрезов оснований инженерных сооружений, контроль качества формирования насыпей земляного полотна и дорожной одежды на этапах изысканий, строительства и эксплуатации линейных объектов транспортной инфраструктуры.

Научная новизна

В ходе выполненных исследований получены нижеследующие новые научные результаты.

Разработан системный подход синтеза согласованной георадиолокационно-электротомографической модели и ее комплексной интерпретации.

На основе лабораторных исследований электрофизических параметров аналоговой георадиолокационной модели установлена эмпирическая зависимость между минерализацией поровой влаги песчаного грунта и его параметром добротности на георадиолокационных частотах.

Совместное использование методов сопротивления и георадиолокации позволило на основе обобщенной модели Арчи, Торр и CRIM рассчитать диэлектрическую проницаемость матрицы песчаного грунта.

Предложена и обоснована необходимость определения параметра добротности для решения задач количественной интерпретации геофизических данных комплекса методов георадиолокации и электротомографии.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность оценки фильтрационных свойств песков.

Практическая значимость

На синтетических и полевых данных показано, что фокусирующая по георадиолокационным осям синфазности инверсия электротомографической модели является эффективным инструментом снижения неопределенности интерпретации геофизических данных, полученных в условиях влияния техногенных помех или в случае высокой степени эквивалентности решения обратной задачи.

В условиях многослойной баковой георадиолокационной модели реализованы способы определения параметра добротности методами амплитудного спада и спектральных отношений.

Разработан подход, основанный на определении параметра добротности и электропроводности при комплексировании методов георадиолокации и сопротивления в рамках исследования песчано-глинистых грунтов, позволяющий рассчитывать значение мнимой части диэлектрической проницаемости, являющейся одним из основных электрофизических индикаторов глинистости разреза.

Технология бесконтактных измерений электрического поля в электротомографическом режиме реализована на асфальтовом покрытии и мерзлом грунте.

Использование комплекса электротомографии и георадиолокации для оценки качества песчаных насыпей, в том числе в условиях многолетнемерзлых грунтов Крайнего Севера, обосновано на синтетических и полевых примерах.

Преимущества и целесообразность комплексирования электротомографии и георадиолокации при геофизических исследованиях автодорог в условиях отсутствия заземлений на асфальтовом покрытии доказаны на основе практических примеров.

Достоверность результатов

Достоверность результатов исследования подтверждается большим объемом экспериментальных работ, воспроизводимостью результатов в повторных опытах,

использованием современной аппаратуры, соответствием авторских результатов, опубликованным данным. Достоверность результатов интерпретации полевых данных подтверждается заверочными инженерно-геологическими работами.

Материалы и методы

Для математических вычислений использовался программный пакет Matlab. Для сбора и первичной обработки данных метода георадиолокации использовались программы Geoscan и Prizm. Для целевой обработки георадарограмм использовалась программа RadexPro. Моделирование синтетических георадарограмм и специальные процедуры обработки выполнены в программе MatGPR. Для атрибутивного анализа георадиолокационных данных использовался пакет интерпретации сейсмических данных Kingdom. Инверсия и моделирование данных ЭТ выполнялась в программах ZondRes2D и Res2Dinv.

При выполнении полевых и лабораторных работ методом ГРЛ были задействованы георадары ОКО-2 и Zond-12 с широким диапазоном частот антенных блоков от 50 до 2000 МГц. Электротомографические исследования на постоянном и переменном токе выполнены с аппаратурой ERA-MULTIMAX, СКАЛА-48 и БИКС.

Личный вклад автора

Теоретические исследования, на которых основана работа, выполнены самостоятельно.

Лабораторные измерения выполнены на самостоятельно спроектированной баковой георадиолокационной модели.

Полевые материалы, используемые в диссертации, получены под руководством автора и при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на общероссийских и международных конференциях и семинарах: Всероссийское литологическое совещание, посвященное 100-летию со дня рождения Л.Б. Рухина. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2012; Научно-практический семинар “Электроразведка в поисковой и инженерной геологии” Памяти профессора В.А. Комарова. Санкт-Петербург, 2013; 8-й Международный геофизический научно-практический семинар “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет ”Горный”, 2010; 11-й Международный геофизический научно-практический семинар “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой

университет ”Горный”, 2013; 12-й Международный геофизический научно-практический семинар “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет ”Горный”, 2015; 13-й Международный геофизический научно-практический семинар “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2016; 10-я Международная научно-практическая конференция “Инженерная геофизика – 2014”. г. Геленджик: EAGE, 2014; 9-я Общероссийская конференция “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. Москва: РАНХиГС, 2013; 12-я Общероссийская конференция “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2016; 89-я сессия Научно-методического совета по геолого-геофизическим технологиям поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Минприроды России. Санкт-Петербург: ФГУНПП “Геологоразведка”, 2014.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, 1 статья в печатном научном издании, и 7 тезисов докладов на конференциях.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка (включающего 166 наименований), содержит 182 страниц машинописного текста, 147 рисунков и 11 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю В.В. Глазунову за ценные советы и всестороннюю помощь в работе над диссертацией, а также глубокую признательность коллегам из компаний “ИнжГеофизика” и “Ленгипротранс” (Санкт-Петербург) за оказанное содействие в выполнении полевых и лабораторных экспериментов.

Краткое содержание работы

Во **введении** дана краткая характеристика современного состояния методов ГРЛ и ЭТ и их роли в области инженерных изысканий объектов транспортного строительства, на основе чего сформулирована актуальность и научная новизна выбранной темы, приведены основные

защищаемые положения. В **первой главе** рассмотрены общие понятия комплексирования геофизических методов, а также теоретические аспекты, касающиеся физических понятий, объединяющих между собой методы ГРЛ и ЭТ. Во **второй главе** рассмотрен вопрос обоснования комплексирования методов ГРЛ и ЭТ на основе математических моделей и демонстрация эффективности и целесообразности такого комплексирования на практических примерах. **Третья глава** посвящена определению электрофизических параметров грунтов и оценке их петрофизических характеристик на основе совместного использования ГРЛ и ЭТ. В **четвертой главе** рассмотрен ряд практических примеров, показывающих необходимость, целесообразность, техническую и экономическую эффективность комплексирования методов ГРЛ и ЭТ для решения целого ряда инженерно-геологических задач на объектах транспортного строительства. В **заключении** приведены основные результаты работы, определены инженерно-геологические задачи, для решения которых целесообразно использовать рассмотренный комплекс методов ГРЛ и ЭТ. Выделены основные направления для дальнейшего развития комплекса.

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И ПРЕДПОСЫЛКИ ИХ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ

Методы георадиолокации и сопротивления в электротомографической модификации, основанные на исследовании комплекса явлений, связанных с возникновением и распространением постоянного во времени или изменяющегося по определенному закону электромагнитного поля, а также с учетом области их применения, классифицируются как методы малоглубинной электроразведки. Предпосылкой их комплексирования являются как общие электромагнитные характеристики, лежащие в их теоретической основе (главным образом комплексная диэлектрическая проницаемость и электропроводность), так и общий круг инженерно-геологических задач, на решение которых они нацелены.

В данной главе, в рамках решения прикладных задач инженерной геологии при изысканиях объектов транспортного строительства, мы рассмотрим общие понятия комплексирования геофизических методов, а также остановимся на теоретических аспектах, касающихся физических понятий, объединяющих методы ГРЛ и ЭТ.

1.1 Инженерно-геологические задачи на объектах транспортного строительства

К объектам транспортного строительства в первую очередь относятся автомобильные и железные дороги, а также инфраструктура транспорта нефти и газа. Сферу применения геофизических методов при исследованиях, связанных с такими объектами, можно разделить на две части: изыскания под строительство новых и обследование уже построенных и эксплуатируемых сооружений. Общими особенностями этих исследований, обусловленными главным образом линейным характером объектов транспортной инфраструктуры и их большой протяженностью, являются следующие: проведение работ в протяженной и относительно узкой полосе, ограниченной шириной сооружения и зоной безопасности его эксплуатации; многообразие инженерно-геологических и гидрогеологических условий; подвижной характер работ ввиду быстрого продвижения по трассе; относительно малый объем опорного бурения и других инженерно-геологических методов и, соответственно, повышение роли геофизических методов в общем комплексе исследований, особенно на начальных стадиях; повышенные требования к портативности и мобильности полевой аппаратуры (Ляховицкий Ф.М. и др., 1989).

Взаимодействие дорог с окружающей средой формируется под воздействием геологической обстановки в пределах трассы, поведения поверхностных и подземных вод, климата, а также вида транспорта и интенсивности движения. В результате в искусственных и естественных грунтах, подстилающих полотно железных и шоссейных дорог, происходят

сложные процессы, многие из которых представляют опасность для сооружения. Их изучение при помощи бурения не всегда эффективно (Огильви А.А., 1990). Таким образом, перед геофизическими методами стоят следующие основные инженерно-геологические задачи:

- определять мощность и степень однородности дренажного слоя грунта;
- расчленять тело насыпи по литологическому составу и состоянию грунтов;
- находить локальные неоднородности в теле насыпи и грунтах основания;
- определять осадку подошвы насыпи, возведенной на слабых грунтах (илах, торфе, сапропелях и т. д.).

В докторской диссертации (Модин И.Н., 2010), посвященной электроразведке в технической и археологической геофизике, И.Н. Модин более конкретно формулирует вопросы, стоящие перед методами электроразведки в рамках исследования железнодорожных и автомобильных насыпей:

- лежит ли насыпь на естественном грунте или она заглублена;
- какова мощность балластного слоя щебня;
- какие грунты слагают насыпь, и какова их мощность;
- лежит ли грубообломочный материал в основании насыпи, и на какой глубине;
- какова влажность грунтов;
- есть ли карст под полотном;
- какова морфология мерзлоты под насыпью;
- существуют ли плавунные отложения под насыпью.

Конкурировать с геолого-техническими дисциплинами по точности геофизика не может. Однако комплексирование более 2–3 геофизических методов с учетом априорной геолого-гидрогеологической информации позволяет успешно решать эти задачи, при этом существенно сокращая время и средства. Наилучший результат достигается только при условии совместной работы специалистов геологического и геофизического профилей (Хмелевской В.К. и др., 2005).

Помимо решения вышеперечисленных задач на качественном уровне, инженерная геология ждет от геофизики определения количественных характеристик тех или иных аномалий, выделенных по геофизическим данным, конечно же независимо подтвержденных и согласованных с данными лабораторных исследований. В целях повышения качества инженерно-геологических материалов и оценке достоверности полевых испытаний грунтов, СП 47.13330.2012 формулирует задачу выявления взаимосвязей между характеристиками грунта, определяемыми на основе различных инженерно-геологических методов в сочетании с другими способами определения состава, состояния и свойств грунтов, в том числе геофизическими.

В некоторых случаях, согласно СП 47.13330.2012, существует возможность повышения эффективности инженерных изысканий на основе использования геофизических исследований:

- вне контуров проектируемых объектов, в случае выдержанности разреза и при подтверждении его однородности геофизическими наблюдениями допускается разрежение сети опробования;
- при подтверждении однородности разреза по результатам геофизических исследований допускается в пределах площадки изысканий смещать точки опробования в места, доступные для проходки, но не более половины рекомендованного расстояния между ними.

1.2 Решение инженерно-геологических задач на основе комплексирования геофизических методов

1.2.1 Общие принципы комплексирования геофизических методов

Фундаментальным вопросам комплексирования посвящено большое количество научных и методических изданий (Кунин Н.Я., 1972; Тархов А.Г. и др., 1982; Комплексирование методов ..., 1984; Бродовой В.В., 1991; Никитин А.А. и Хмелевской В.К., 2004), большинство из которых акцентировано на комплексировании геофизических методов при поисково-разведочных работах в отрасли геологоразведки. В рамках инженерных изысканий основы комплексирования геофизических методов подробно описаны в работе (Огильви А.А., 1990). Все авторы сходятся во мнении, что основная идея и цель комплексирования геофизических методов заключается в достижении однозначного решения конкретной геологической, инженерно-геологической и т.д. задачи (Никитин А.А. и Хмелевской В.К., 2004; СП 11-105-97 ч.6., 2004).

Задача выбора геофизического комплекса не имеет аналитического решения ввиду многообразия факторов, от которых зависит его выбор. Между тем, существует ряд принципов комплексирования, которых необходимо придерживаться. Согласно (Никитин А.А. и Хмелевской В.К., 2004) при выборе комплекса, прежде всего, используются достаточно общие принципы, к которым относятся:

1. принцип аналогии, базирующийся на опыте исследований, проведённых в сходных геологических условиях, который до сих пор является основным при комплексировании методов;
2. принцип последовательных приближений, обусловленный стадийностью геологоразведочного процесса и возрастающей детальностью исследований объекта по правилу от “общего к частному”;

3. принцип оптимальности – требует достижения наиболее полного решения геологической задачи при минимально возможных затратах средств и времени.

В рамках решения инженерно-геологических задач А.А. Огильви (Огильви А.А., 1990) сводит принципы комплексирования геофизических методов к следующим наиболее общим положениям:

1. каждый из используемых методов должен обнаруживать присутствие геологического объекта;
2. данные разных методов должны обнаруживать не только сходство, но и различие качеств изучаемого объекта;
3. задачи, стоящие перед геофизическим комплексом, и методы исследований должны быть согласованы как между собой, так и с методами инженерно-геологических исследований.

1.2.2 Виды комплексирования геофизических методов

При формировании геофизического комплекса выделяют следующие его виды (Никитин А.А. и Хмелевской В.К., 2004):

- **типовой комплекс**, создаваемый для достаточно обобщенных и в то же время наиболее типичных геологических и геоморфологических условий проведения работ. Типовой комплекс может содержать избыточное число геофизических методов, поскольку в него включают все методы, в той или иной мере способствующие решению поставленной задачи.
- **рациональный комплекс**, представляющий геологически и экономически обоснованное сочетание геофизических методов и сопровождающих их геологических и геохимических видов исследований с целью эффективного решения поставленной задачи (Тархов А.Г. и др., 1982). Особенностью рационального комплекса является его привязка к определенным, а не к типовым, геологическим, геоморфологическим и геолого-экономическим условиям конкретного объекта.
- **оптимальный комплекс**, создаваемый на основе использования того или иного критерия оптимальности. Выбор оптимального комплекса может быть реализован лишь в хорошо изученных регионах при наличии достаточного статистического материала по выявлению ложных аномалий и связанных с ними экономических затрат.

В данной работе мы будем рассматривать методы георадиолокации и электротомографии в рамках рационального комплекса и руководствоваться определением А.А. Огильви, который понимает под ним комплекс геофизических методов, применяемых в

определенной последовательности, позволяющей наиболее полно решать поставленную инженерно-геологическую задачу при минимальной затрате времени и средств. При этом геофизические методы должны быть согласованы с традиционными инженерно-геологическими, с тем, чтобы результаты исследований могли существенно расширить имеющиеся представления об объекте.

1.3 Методы электротомографии и георадиолокации и их теоретические основы

1.3.1 Метод георадиолокации

Анализ литературных данных показывает, что кульминация накопленных знаний о методе георадиолокации в рамках решения геологических задач в России приходится на публикацию работ М.И. Финкельштейна (Финкельштейн М.И. и др., 1977; Финкельштейн М.И. и др., 1986; Финкельштейн М.И. и др., 1994), а за рубежом на наиболее часто цитируемую работу геофизиков из Канады J.L. Davis и A.P. Annan (Davis J.L. and Annan A.P., 1989). Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики подробно рассмотрено в работе Н.Н. Ефимовой (Ефимова Н.Н., 1999). Прикладное значение метода георадиолокации в области инженерных изысканий на сегодняшний день отмечено действующими нормативными документами по инженерным изысканиям. В нашей стране это (СП 47.13330.2012, 2012; СП 11-105-97 ч.6., 2004), а за рубежом – (ASTM D6429-99, 2011; ASTM D6432-99, 2005).

1.3.2 Метод электротомографии

Электротомография является модификацией метода сопротивлений, берущего свое начало в работах Конрада Шлюмберже (Schlumberger C., 1920). Придя на смену и в дополнение к традиционным вертикальным электрическим зондированиям и электропрофилированию, сначала в виде сплошных электрических зондирований (Бобачев А.А. и др., 1996), а затем, вооружившись алгоритмом 2D инверсии кажущихся сопротивлений в истинные значения УЭС (Loke M.H. and Barker R.D., 1996; Каминский А.Е., 2012), новая методика получила свое современное название. В распространенной в настоящее время терминологии электротомография – это методика, направленная на изучение двумерно-неоднородных сред, выполняемая по профилю (Павлова А.М., 2014). 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). Использование электрической томографии в области инженерных изысканий регламентировано в (СП 11-105-97 ч.6., 2004).

Особенностью электротомографии по сравнению с традиционными модификациями метода сопротивлений является активное использование программно-алгоритмической базы,

которая в последние годы серьезно отразилась на подходе к интерпретации полевых материалов. По мнению разработчика программы автоматической инверсии данных ЭТ ZondRes2D А.Е. Каминского, ответственность за результат все чаще возлагается на машину. Во многих организациях даже приветствуется формальный подход к интерпретации данных и всячески пресекается отход от стандартного графа. Ряд свойств обратной задачи электроразведки позволяет сделать вывод о необоснованности такого подхода к интерпретации. Слепое доверие интерпретатора к результатам работы алгоритма может привести к получению неадекватных результатов, компрометирующих геофизику в глазах геолога. Не следует забывать, что алгоритм инверсии подобен черному ящику – качество результата напрямую зависит от количества заложенной априорной информации.

1.3.3 Электродинамические основы методов георадиолокации и электротомографии

Дж. К. Максвелл обобщил экспериментальные законы Кулона, Ампера, Био – Савара - Лапласа и Фарадея и сформулировал уравнения, ставшие фундаментом всей электродинамики.

Каноническая форма записи уравнений принадлежит Г. Герцу и О. Хевисайду и основана на использовании векторных полей: напряжённости электрического поля \vec{E} , В/м; напряжённости магнитного поля \vec{H} , А/м; векторов электрической индукции \vec{D} , Кл/м² и магнитной индукции \vec{B} , Тл. Уравнения Максвелла связывают эти величины между собой, а также с объемной плотностью электрического заряда q , Кл/м³ и плотностью электрического тока \vec{j} А/м², которые рассматриваются как источники электрического и магнитного поля соответственно (Стрэттон Дж. А., 1948).

Полная система уравнений Максвелла (таблица 1.1) представляет собой систему дифференциальных уравнений, решение которых позволяет определить характеристики электрического и магнитного поля в любой точке пространства в любой момент времени.

Таблица 1.1 – Полная система уравнений Максвелла

Закон	Уравнение в дифференциальной форме	Номер уравнения
Закон Био – Савара - Лапласа	$rot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	(1.1)
Закон Фарадея для электромагнитной индукции	$rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	(1.2)
Вихревой характер магнитного поля	$div \vec{B} = 0$	(1.3)

<i>Закон</i>	<i>Уравнение в дифференциальной форме</i>	<i>Номер уравнения</i>
Теорема Остроградского - Гаусса	$\operatorname{div} \vec{D} = q$	(1.4)
Определение вектора электрической индукции	$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$	(1.5)
Определение вектора индукции магнитного поля	$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$	(1.6)
Закон сохранения электрического заряда	$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$	(1.7)
Закон Ома для полной цепи	$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}})$	(1.8)

Здесь ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ - относительная магнитная проницаемость среды; ε_0 - электрическая постоянная, $8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; μ_0 - магнитная постоянная, $1.257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; σ - удельная проводимость среды, См/м.

Согласно этим уравнениям, если известно распределение зарядов в пространстве и заданы характеристики электрического и магнитного поля в начальный момент времени, а также заданы характеристики среды, можно найти характеристики электрического и магнитного поля в любой момент времени в любой точке пространства.

1.3.4 Электрофизические понятия метода георадиолокации

Если векторы поля \vec{E} и \vec{H} изменяются во времени по гармоническому закону, то гармонические функции времени могут быть представлены комплексными числами и, соответственно, сами векторы будут комплексными.

Тогда уравнения (1.1) и (1.2) с учетом материальных уравнений (1.5) и (1.6) в комплексной форме для гармонических колебаний могут быть записаны как

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}, \quad (1.9)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E}, \quad (1.10)$$

где

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'', \quad (1.11)$$

комплексная электропроводность, характеризующая способность среды проводить электрический ток (σ' , σ'' - действительная и мнимая части комплексной электропроводности).

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' , \quad (1.12)$$

комплексная диэлектрическая проницаемость (Sen P.N. et al, 1981; Davis J.L., Annan A.P., 1989) (ε' - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, а ε'' - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика).

μ

магнитная восприимчивость среды. Если материал слабомагнитный, то допустима аппроксимация $\mu \approx \mu_0$.

Из уравнения (1.10) следует, что для электропроводящих диэлектриков макроскопические параметры σ и ε всегда находятся в сочетании $\sigma + j\omega\varepsilon$. Разделив эти параметры на их реальные и мнимые части, это сочетание может быть переписано в виде

$$\sigma + j\omega\varepsilon = (\sigma' + \omega\varepsilon'') + j\omega\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}\right) = \sigma_e + j\omega\varepsilon_e, \quad (1.13)$$

где

$$\sigma_e = \sigma' + \omega\varepsilon'', \quad (1.14)$$

определяется как действительная эффективная электропроводность,

$$\varepsilon_e = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}, \quad (1.15)$$

действительная эффективная диэлектрическая проницаемость.

Действительная эффективная электропроводность определяет ток в фазе с электрическим полем, а действительная эффективная диэлектрическая проницаемость связана с током вне фазы электрического поля.

Полезно также определить комплексную кажущуюся диэлектрическую проницаемость ε^* , как

$$\varepsilon^* = \sigma_e + j\omega\varepsilon_e . \quad (1.16)$$

И тангенс диэлектрических потерь $\tan \delta$, как

$$\tan \delta = \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_e} . \quad (1.17)$$

Если подставить (1.17) в (1.16), комплексная кажущаяся диэлектрическая проницаемость может быть выражена через функцию тангенса диэлектрических потерь

$$\varepsilon^* = \varepsilon_e(1 - j \tan \delta) . \quad (1.18)$$

Благодаря этому определению комплексной кажущейся диэлектрической проницаемости выражение (1.10) может быть записано

$$\operatorname{rot} \vec{H} = j\omega \varepsilon^* \vec{E}. \quad (1.19)$$

Подставляя (1.9) в (1.19), получаем волновое уравнение, описывающее распространение электромагнитной волны в диэлектрической среде с потерями

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon^* \mu \omega^2 \vec{E} = 0. \quad (1.20)$$

Решение уравнения (1.20) представляет собой гармоническую плоскую волну, распространяющуюся по направлению \vec{k} (Кудрявцев Ю.И., 1981)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\vec{k}\vec{r}}, \quad (1.21)$$

где $\vec{k} = |\vec{k}|$ – волновое число, определяющееся как

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon^* \mu}. \quad (1.22)$$

Волновое число – комплексная величина и может быть представлено действительной и мнимой частями

$$jk = \alpha + j\beta. \quad (1.23)$$

Тогда решение уравнения плоской волны (1.21) будет иметь вид (Ward S.H., Hohmann G.H. 1988; Найт W., 1989)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha}\vec{r}} e^{-j\vec{\beta}\vec{r}}. \quad (1.24)$$

Первый экспоненциальный член описывает затухание радиоволны в среде с потерями. Степень затухания определяется коэффициентом затухания α . Второй экспоненциальный член определяет распространение волны, фаза которой регулируется с помощью фазовой постоянной β . Коэффициент затухания и фазовая постоянная задаются следующими уравнениями:

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_e} \sqrt{0.5(\sqrt{1 + tg^2 \gamma \delta} - 1)} \quad (\text{дБ/м}), \quad (1.25)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_e} \sqrt{0.5(\sqrt{1 + tg^2 \gamma \delta} + 1)} \quad (\text{рад/м}). \quad (1.26)$$

Из уравнения (1.25) следует, что затухание ЭМ волны в среде зависит как от электропроводности среды, так и от ее диэлектрических свойств.

Для упрощения параметров, характеризующих распространение электромагнитной волны в поглощающей среде, используется ряд аппроксимаций. Использование тех или других аппроксимаций зависит от характера приложения метода, а также от частотной области, в которой производится работа. Для метода георадиолокации, в котором исследуемым материалом являются горные породы, а используемые частоты лежат в диапазоне от МГц до ГГц, обычно используются следующие аппроксимации.

1. Влияние мнимой части электропроводности пренебрежимо мало по сравнению с влиянием ее действительной части, или

$$\varepsilon' \gg \frac{\sigma''}{\omega}. \quad (1.27)$$

Другими словами, электропроводность грунтов берется равной электропроводности на постоянном токе: $\sigma = \sigma_{DC}$. Это значит, что эффективная электропроводность и эффективная диэлектрическая проницаемость могут быть представлены в следующем виде

$$\begin{cases} \sigma_e = \sigma_{DC} + \omega\varepsilon'' \\ \varepsilon_e = \varepsilon' \end{cases}. \quad (1.28)$$

2. Грунты рассматриваются как диэлектрики с малыми потерями, имеющими небольшой тангенс диэлектрических потерь:

$$(\tan \delta)^2 \ll 1. \quad (1.29)$$

Данное приближение верно, когда содержание воды в грунте небольшое.

В рамках этих приближений постоянная затухания и фазовая константа могут быть записаны как

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'} \frac{\tan \delta}{2}, \quad (1.30)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'}. \quad (1.31)$$

Скорость распространения волны v связана с фазовой константой как

$$v = \frac{\omega}{\beta}. \quad (1.32)$$

Используя аппроксимации (1.27) и (1.29) скорость распространения электромагнитной волны в грунте может быть выражена как

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}}, \quad (1.33)$$

где c – скорость света в вакууме, ε'_r – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости. Выражение (1.33) является основным допущением, используемым в

георадиолокации, которое справедливо даже для грунтов с большими потерями (высокое содержание воды) до того момента, пока выполняется неравенство $\tan \delta < 1$ (Daniels D.J., 1996).

1.3.5 Электрофизические понятия метода сопротивлений

Для определения ρ грунта в методе сопротивлений поверхность земли в первом приближении считают поверхностью полупространства и используют понятие точечного источника. Под точечным источником понимают такой источник (полусферический электрод), размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями, на которых исследуют поле, создаваемое втекающим через него в землю током I . УЭС материала, из которого изготовлен электрод, настолько мало по сравнению с сопротивлением вмещающей среды, что практически все потенциалы точек электрода можно считать одинаковыми, т.е. эквипотенциальными. Предполагается также, что ток вытекает из полупространства, через другое заземление, влиянием которого можно пренебречь в связи с тем, что оно находится на бесконечном удалении от точечного источника.

Решение задачи о поле полусферического электрода упрощается, если, используя метод зеркальных изображений (Альпин Л.М. и др., 1985), дополнить нижнее полупространство его зеркальным изображением в плоскости раздела земля – воздух. В этом случае решение задачи о поле полусферического электрода, расположенного на поверхности полупространства (рисунок 1.1 а), совпадает с решением задачи о поле сферического электрода, питаемого током $2I$ и расположенного в полном пространстве (рисунок 3.1 б) (Якубовский Ю.В. и Ренард И.В., 1991).

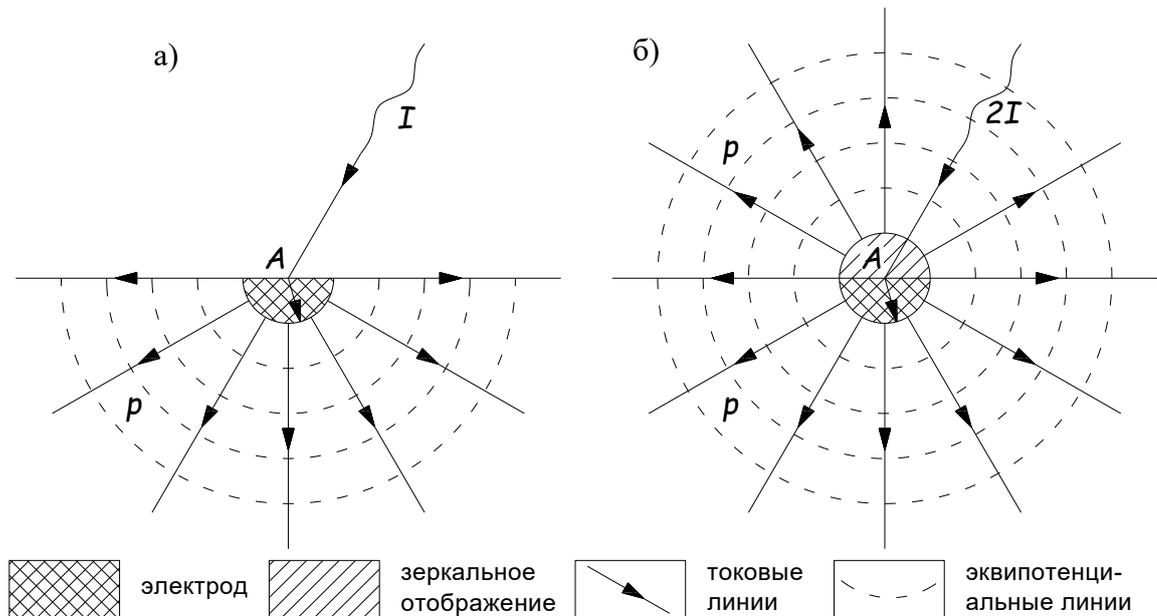


Рисунок 1.1 – Нормальное поле (а) полусферического (б) сферического электрода (Якубовский Ю.В. и Ренард И.В., 1991)

В случае постоянного тока производные по времени в уравнениях Максвелла равны нулю, и, как следствие из (1.2)

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 . \quad (1.34)$$

Электрическое поле, удовлетворяющее этому условию, можно выразить через градиент скалярного потенциала U :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} U . \quad (1.35)$$

В однородной среде заряды не накапливаются, поэтому

$$\varepsilon \operatorname{div} \vec{E} = 0 \text{ или } \operatorname{div} \operatorname{grad} U = 0 . \quad (1.36)$$

Таким образом, потенциал в рассматриваемом случае подчиняется уравнению Лапласа

$$\Delta U = 0 . \quad (1.37)$$

Необходимо определить потенциал и напряженность поля на расстоянии r от источника. В сферической системе координат с учетом симметрии уравнение Лапласа имеет вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) = 0 . \quad (1.38)$$

Его решением является функция, обратно пропорциональная r :

$$U = C_1/r + C_2 , \quad (1.39)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

При $r \rightarrow \infty$ потенциал должен стремиться к нулю, поэтому $C_2 = 0$.

С учетом (1.35), из (1.39) получаем напряженность электрического поля

$$\vec{E} = -\frac{\partial U}{\partial r} \vec{r} = \frac{C_1 \vec{r}}{r^3} . \quad (1.40)$$

Чтобы определить константу C_1 , окружим точечный источник полусферой радиусом r . По закону Ома

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma \frac{C_1 \vec{r}}{r^3} . \quad (1.41)$$

Плотность тока на расстоянии r от точечного источника будет очевидно равна полному току, деленному на площадь поверхности полусферы:

$$|\vec{j}| = \frac{I}{2\pi r^2} . \quad (1.42)$$

Отсюда следует, что

$$C_1 = \frac{I}{2\pi\sigma} = \frac{I\rho}{2\pi}. \quad (1.43)$$

И мы получаем формулы для потенциала и напряженности электрического поля точечного источника (Крылов С.С., 2004):

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r}, \quad (1.44)$$

$$E = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \vec{r}. \quad (1.45)$$

Полученные формулы позволяют определять по измеренному полю УЭС однородного полупространства. Для практической реализации измерений разности потенциалов U в электроразведке используют различные комбинации приемных и питающих электродов. Французский инженер Конрад Шлюмберже, с работ которого фактически и началась электроразведка, в начале XX века впервые для этих целей предложил использовать четырехэлектродную установку (рисунок 1.2) (Schlumberger С., 1920).

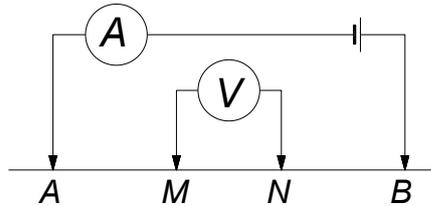


Рисунок 1.2 – Четырехэлектродная установка Шлюмберже

Пусть измерения проводятся в однородном изотропном полупространстве с помощью четырехэлектродной установки и пусть через электрод A в среду втекает ток I , а через электрод B вытекает ток $-I$. Определим разность потенциалов на электродах M и N . Потенциал есть аддитивная функция, следовательно, потенциалы от электродов A и B в точке M сложатся:

$$U(M) = \frac{I\rho}{2\pi r_{AM}} - \frac{I\rho}{2\pi r_{BM}} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right). \quad (1.46)$$

Аналогично находим выражение для потенциала в точке N :

$$U(N) = \frac{I\rho}{2\pi r_{AN}} - \frac{I\rho}{2\pi r_{BN}} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right). \quad (1.47)$$

Тогда

$$U(M) - U(N) = \Delta U = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right] = \frac{I\rho}{k}, \quad (1.48)$$

где k называется коэффициентом установки. Можно выразить его в следующем виде:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}. \quad (1.49)$$

Таким образом, зная силу тока I источника и определив разность потенциалов ΔU , используя электроразведочную установку с известным коэффициентом k , можно рассчитать УЭС однородного изотропного полупространства:

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I}. \quad (1.50)$$

Основные особенности электротомографической модификации метода сопротивлений сформулированы в работе (Модин И.Н., 2010):

- линейный шаг по разносам, равный шагу по профилю;
- одни и те же электроды используются в качестве приемных и питающих, при этом токи в АВ не превышают 1-2 А;
- для получения данных используются многоэлектродные косы (как правило, на 48, 64, 72 или 96 электродов), в которых электроды переключаются либо с помощью встроенных в станцию коммутаторов, либо встроенных в электроды интеллектуальных устройств, которые управляются по специальным каналам внутри косы;
- управление и сбор данных осуществляются станциями, которые работают в автоматическом режиме по заданным протоколам подключения четырехполюсников АВМN (лучшие образцы станций являются многоканальными);
- в качестве основных установок используются трехэлектродная Шлюмберже AMN+MNB и в ряде случаев дипольная осевая АВМN;
- для интерпретации данных используются программы автоматической двумерной инверсии.

1.3.6 Электрофизические предпосылки комплексирования методов георадиолокации и сопротивления

Параметр добротности Q (quality factor) определяется в стандарте IEEE 145-1983 как отношение накопленной энергии к энергии, потерянной за один период колебаний.

Для сейсмических волн установлено, что добротность Q не зависит от частоты в широком диапазоне частот и описывается уравнением

$$Q = \frac{\omega}{2\nu\alpha}, \quad (1.51)$$

где α – коэффициент затухания, а ν – скорость распространения волны. Это подразумевает линейную зависимость затухания от частоты. В работе (Turner G., Siggins A.F., 1994) доказывается, что данная зависимость справедлива и для случая распространения электромагнитных волн в грунтах с небольшими потерями, что в данной ситуации дает

возможность определения добротности Q по формуле (1.51). В работе (Turner G., Siggins A.F., 1994) также вводится понятие параметра кажущейся добротности Q^* , который является обобщением Q для случая затухания электромагнитной волны на георадиолокационных частотах в грунтах и горных породах. Параметр Q^* описывает градиент линейной зависимости, лучше всего аппроксимирующей кривую затухания, причем затухание на нулевой частоте может быть и не нулевым. На рисунке 1.3 приведены значения Q^* для различных линейных аппроксимаций измеренных значений затухания в песке и глине различной водонасыщенности (Charles E.E., Maillol J.M., 2008).

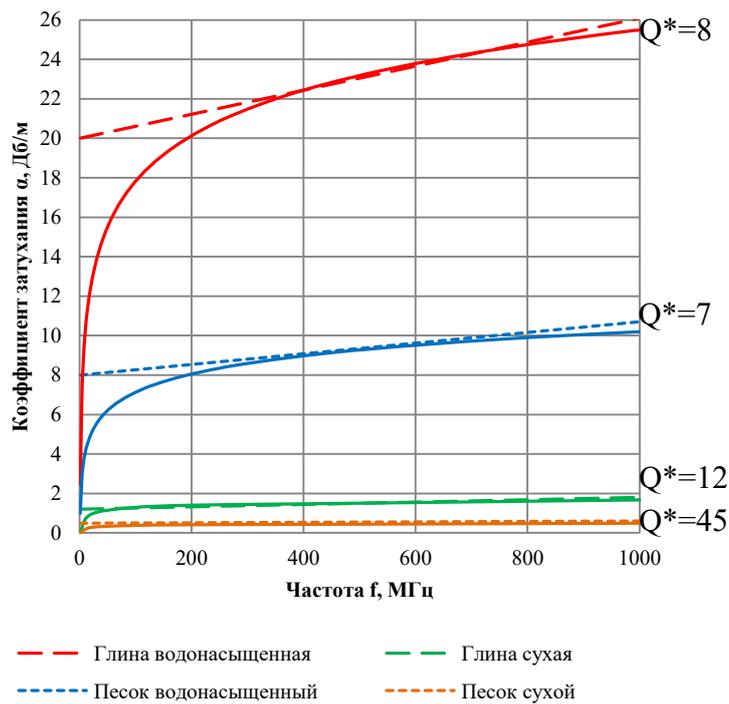


Рисунок 1.3 – Зависимости коэффициента затухания от частоты для сухой и водонасыщенной глины и сухого и водонасыщенного песка. Параметры кажущейся добротности Q^* (Charles E.E., Maillol J.M., 2008)

Значения Q взаимосвязаны с электрофизическими параметрами грунтов и, как правило, лежат в пределах от 2 до 30.

Подставляя (1.51) в (1.30), получаем

$$Q = \frac{\omega}{2\nu\alpha} = \frac{\omega}{2\nu(\tan \delta / 2\nu)} = \frac{1}{\tan \delta}. \quad (1.52)$$

Таким образом, в случае допущения, что параметр Q является константой, тангенс диэлектрических потерь не будет зависеть от частоты, так же как и действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' (поскольку α линейно зависит от частоты). Последнее

допущение является, как правило, справедливым для георадиолокационных частот. Измерения на различных образцах показывают, что первое допущение ($\tan \delta$ не зависит от частоты) не всегда корректно, в особенности в тех случаях, когда в грунтах наблюдается высокое содержание воды (Giroux V. and Chouteau M., 2010).

Как бы то ни было, наиболее важным наблюдением является то, что частотная зависимость всех электрофизических параметров дает в результате зависимость затухания от частоты, близкую к линейной. Модель постоянной добротности Q обеспечивает механизм описания затухания и рассеяния электромагнитных волн в грунте одним единственным параметром Q . Коэффициент затухания и фазовая константа линейно зависят от частоты и описываются выражениями

$$\alpha = \frac{\sqrt{\mu\varepsilon'}\omega}{2Q}, \quad (1.53)$$

$$\beta = 2\alpha Q. \quad (1.54)$$

Таким образом, добротность можно рассматривать как дополнительный независимый электрофизический параметр, который может быть использован для характеристики свойств грунта.

Используя георадиолокационную аппроксимацию малых потерь и полученные на ее основе формулы (1.28), выражающие эффективные значения диэлектрической проницаемости и электропроводности, получим аналитическую зависимость, связывающую электропроводность, действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости среды (Wunderlich T., Rabbel W., 2013; Vano M., 2004; Scheers B., 2001):

$$Q = \frac{\omega\varepsilon_e}{\sigma_e} \approx \frac{\omega\varepsilon'}{\sigma_{DC} + \omega\varepsilon''}. \quad (1.55)$$

Уравнение (1.55) позволяет определить при известных значениях ε' и σ_{DC} величину ε'' . Таким образом, мнимая часть диэлектрической проницаемости ε'' , характеризующая потери поляризационной энергии электромагнитного импульса во время релаксации, может быть определена по значению параметра Q при известной электрической проводимости σ на постоянном токе.

В таблице 1.2 приводится обобщение основных электрофизических характеристик грунтов и их аппроксимаций, рассмотренных в данном разделе.

Таблица 1.2 – Обобщение основных электрофизических величин и характеристик грунтов

<i>Величина</i>		<i>Выражение</i>	<i>Аппроксимация</i>
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ε_0	$\approx 8.85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$	
Магнитная восприимчивость вакуума	μ_0	$= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Гн/м}$	
Комплексная диэлектрическая проницаемость	ε	$= \varepsilon' - j\varepsilon''$	
Действительная часть диэлектрической проницаемости	ε'		не зависит от частоты
Мнимая часть диэлектрической проницаемости	ε''		
Комплексная электропроводность	σ	$= \sigma' - j\sigma''$	
Действительная часть электропроводности	σ'		$= \sigma_{DC}$
Мнимая часть электропроводности	σ''		$= 0$
Магнитная восприимчивость	μ		$= \mu_0$ (для грунтов и горных пород)
Эффективная электропроводность	σ_e	$= \sigma' + \omega \varepsilon''$	
Эффективная диэлектрическая проницаемость	ε_e	$= \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}$	
Тангенс диэлектрических потерь	$\tan \delta$	$= \frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e}$	$= \frac{\sigma_{DC} + \omega \varepsilon''}{\omega \varepsilon'}$
Добротность	Q	$= \frac{1}{\tan \delta}$	$= \frac{\omega \varepsilon'}{\sigma_{DC} + \omega \varepsilon''}$
Кажущаяся диэлектрическая проницаемость	ε^*	$= \varepsilon_e (1 - j \tan \delta)$	$= \varepsilon' (1 - j \tan \delta)$
Волновое число	k	$= \omega \sqrt{\varepsilon^* \mu} = \beta - j\alpha$	

<i>Величина</i>		<i>Выражение</i>	<i>Аппроксимация</i>
Постоянная затухания	α	$= \omega \sqrt{\mu \varepsilon_e} \sqrt{0.5(\sqrt{1 + tg^2 \gamma \delta} - 1)}$	$= \omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \frac{\tan \delta}{2}$
Фазовая константа	β	$= \omega \sqrt{\mu \varepsilon_e} \sqrt{0.5(\sqrt{1 + tg^2 \gamma \delta} + 1)}$	$= \omega \sqrt{\mu \varepsilon'}$
Скорость света в вакууме	c	$\approx 3.10^8$ м/с	
Скорость распространения ЭМ волны	v	$= \omega / \beta$	$= \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon'}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}}$

Выводы к главе 1

Предпосылкой комплексирования методов георадиолокации и электротомографии являются как общий круг инженерно-геологических задач, так и взаимосвязь электрофизических параметров, лежащих в основе рассматриваемых методов. Особого внимания заслуживает параметр добротности, связывающий между собой комплексную диэлектрическую проницаемость и электропроводность, позволяющий рассматривать аналитическую совокупность методов георадиолокации и электротомографии.

В соответствии с общими принципами комплексирования геофизических методов практическая значимость комплекса георадиолокации и электротомографии не вызывает сомнения. Между тем, какой-либо системный подход к комплексированию данных методов в настоящий момент отсутствует.

Таким образом, первым шагом к разработке системного подхода к комплексированию будет аналитическое обоснование комплекса георадиолокации и электротомографии и демонстрация практических примеров его успешной реализации.

ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЛЕКСИРОВАНИЮ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

В данной главе рассмотрен вопрос обоснования комплексирования методов георадиолокации и электротомографии на основе построения комплексной геолого-геофизической модели, характеризующейся пространственной корреляцией георадиолокационных и геоэлектрических границ, отражающих взаимосвязанные изменения электрофизических параметров. Комплексирование методов георадиолокации и электротомографии повышает достоверность геологической интерпретации геофизических данных и обеспечивает снижение эквивалентности определения геометрических характеристик песчано-глинистого разреза, что подтверждается результатами математического моделирования и рядом практических примеров.

Целью данной главы является обоснование возможности комплексирования методов ГРЛ и ЭТ с использованием математических моделей, разработка методического подхода к комплексированию и демонстрация его эффективности и целесообразности на практических примерах.

2.1 Анализ достоинств и недостатков методов георадиолокации и электротомографии

Анализ достоинств и недостатков методов ЭТ и ГРЛ, выполненный в работе (Лаломов Д.А., Глазунов В.В., 2015), позволил авторам рассматривать совокупность методов в качестве оптимального комплекса геофизических исследований песчано-глинистых разрезов. Сопоставление возможностей методов ЭТ и ГРЛ представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сопоставление возможностей методов ЭТ и ГРЛ

<i>Электротомография</i>	<i>Георадиолокация</i>
Ограниченные возможности выделения геоэлектрических границ в связи с гладким распределением значений УЭС в инверсионной геоэлектрической модели	Однозначное выделение кинематических и динамических границ на георадарограммах
Неоднозначность определения параметров инверсионной геоэлектрической модели за счет влияния принципа эквивалентности	Интервалы действия принципа эквивалентности параметров георадиолокационных разрезов не велики и могут быть существенно уменьшены на основе априорной геологической информации

<i>Электротомография</i>	<i>Георадиолокация</i>
Неограниченная и регулируемая глубинность зондирования инженерно-геологического разреза в любых геоэлектрических условиях	Ограниченная геоэлектрическими условиями среды глубинность зондирования, особенно при наличии низкоомных грунтов
Ограниченная пространственная разрешающая способность, обусловленная интегральным характером наблюдений	Высокая разрешающая способность за счет суженной диаграммы направленности антенной системы и высокой плотности точек зондирования
Определение количественных геоэлектрических характеристик грунтов	Ограниченные возможности определения значений электрофизических свойств грунтов

Проблемы, с которыми сталкивается метод электротомографии на этапах обработки и интерпретации данных, рассмотрены разработчиком программы ZondRes2D А.Е. Каминским в курсе лекций, которые автор ежегодно читает в Санкт-Петербургском горном университете в рамках программы повышения квалификации инженеров-геофизиков. Среди основных проблем, – формальный подход к обработке и интерпретации:

- отсутствует предварительное математическое моделирование;
- система наблюдений выбирается по умолчанию;
- отсутствует отбраковка данных, когда в лучшем случае убираются только сильные “отскоки”;
- глубина результирующей модели выбирается из технического задания, а не из реальных возможностей метода;
- отсутствует учет априорной информации, когда в лучшем случае ограничиваются минимальным и максимальным пределами параметров;
- отсутствует оценка качества полученного решения.

Результатом таких упущений являются:

- слабое разрешение по глубине;
- сильные разрывы в структуре разреза;
- многочисленные математические артефакты, приуроченные в основном к нижней части разреза;
- объекты с аномально высокими или низкими значениями параметров;
- эффект “прилипания” структуры к поверхности под сильными формами рельефа;

- образование “ушек” у вертикальных и субвертикальных объектов.

Подобные проблемы, связанные с формальным подходом, не чужды любому геофизическому методу, в том числе и методу георадиолокации. Недостатки, которыми обладает геофизическая модель, полученная в результате формального подхода, являются следствием человеческого фактора и могут быть нивелированы квалифицированными специалистами.

Рассмотрим теперь некоторые принципиальные недостатки методов, связанные с образованием георадиолокационных и геоэлектрических границ.

Одним из недостатков метода электротомографии является отсутствие возможности выделения четких геоэлектрических границ из-за гладкого распределения УЭС в инверсионной геоэлектрической модели (Лаломов Д.А., 2012). Таким образом, понятие геоэлектрическая граница переходит в разряд условных из-за того, что в практическом понимании в методе электротомографии такая граница отсутствует. Кроме того, в электроразведке существует принцип эквивалентности, заключающийся в практическом равенстве однотипных физических полей разным моделям строения геологического разреза, особенно горизонтально-слоистого (Модин И.Н., 2010). Например, в работе (Павлова А.М., 2014) подробно рассмотрен эффект ограничения глубины нижней кромки трехмерного объекта в данных двумерной профильной электротомографии, когда положение электротомографических границ может существенно отличаться от литологических границ реального трехмерного геологического объекта.

В свою очередь, на георадиолокационных разрезах во временном масштабе положение границ в большинстве случаев определяется однозначно. Кроме того, помимо кинематических границ (оси синфазности), возникающих на границах раздела сред с различными значениями действительной части диэлектрической проницаемости (рисунок 2.1 а), существуют динамические границы (частный случай изменения волновой картины) (рисунок 2.1 б). Данный тип границ не связан с изменениями действительной части диэлектрической проницаемости и обусловлен либо затуханием сигнала при переходе электромагнитной волны в среду с высокой электропроводностью, либо, наоборот, отсутствием каких-либо отражений в среде с очень низкой электропроводностью. Таким образом, электрофизическими характеристиками динамических границ будут являться мнимая часть диэлектрической проницаемости и электропроводность, связанные через параметр добротности среды Q .

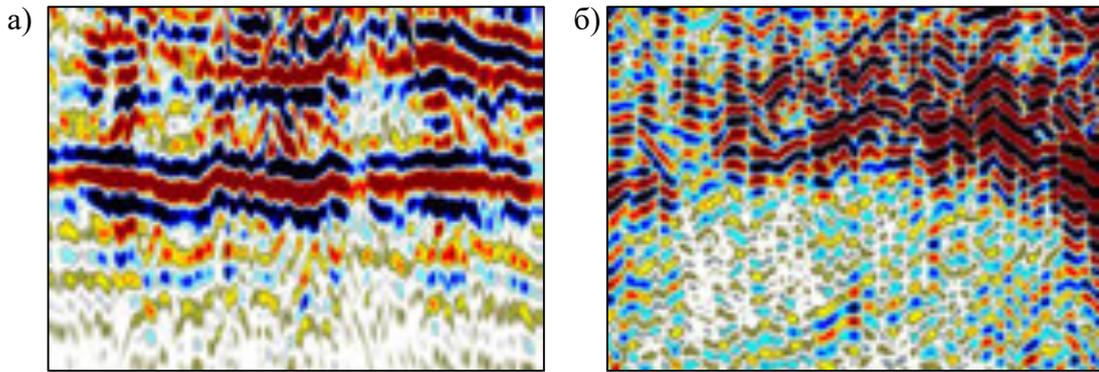


Рисунок 2.1 – Пример георадиолокационной (а) кинематической и (б) динамической границы

Кроме быстрого затухания зондирующего сигнала в низкоомных грунтах существенным недостатком метода георадиолокации является не всегда корректный переход от временного разреза к глубинному, что зачастую обусловлено отсутствием априорной информации о скорости распространения электромагнитной волны в исследуемых грунтах. Например, пространственное изменение положения границы может быть вызвано как изменением геометрии разреза, так и изменением влажности на разных его интервалах (Бричева С.С., Крылов С.С., 2014). Таким образом, при переходе из временного вертикального масштаба в глубинный изменения геометрии и влажности будут приводить к эквивалентным искривлениям отражающей границы.

Например, в сейсмоакустике при построении глубинных разрезов для верхней толщи осадков часто берут среднюю скорость по данной толще, которая совпадает, в том числе и со скоростью распространения звука в воде (около 1500 м/с). Грунты, исследуемые методом георадиолокации, имеют более контрастные отличия своих скоростных характеристик и использование какого-то значения средней скорости, зачастую, бывает недопустимо.

Практический опыт показывает, что сопоставление электротомографических моделей и георадарограмм, построенных с единым значением скорости распространения электромагнитной волны (или диэлектрической проницаемости) по всей длине и на всю глубину исследования, приводит к тому, что геоэлектрические и георадиолокационные границы часто могут не совпадать между собой. Причем в случае разреза с контрастными отличиями диэлектрических проницаемостей слоев отклонения могут достигать до нескольких метров. Данное несоответствие при комплексировании методов электротомографии и георадиолокации при сопоставлении георадиолокационного и электротомографического разрезов бросает тень сомнения в достоверности результатов исследований как одного, так и другого метода электроразведки. Единственным выходом из сложившейся ситуации является кропотливая послойная интерпретация георадиолокационных данных с корректным определением скоростей распространения электромагнитной волны в каждом из выделяемых слоев. А также учет

георадиолокационных границ при инверсии электротомографических данных и построение комплексной георадиолокационно-электротомографической модели.

Таким образом, обоснованием возможности комплексирования методов георадиолокации и электротомографии на основе совместной интерпретации данных и выделении общих границ на электротомографических и георадиолокационных разрезах будет являться доказательство пространственной корреляции и взаимосвязи между этими границами.

Ключевым пунктом обоснования возможности комплексирования методов на основе совместной интерпретации данных ЭТ и ГРЛ является наличие и характер пространственной корреляции границ, выявляемых на геоэлектрических и георадиолокационных разрезах. На геоэлектрических разрезах границы характеризуются скачкообразным изменением УЭС (ρ), а на георадиолокационных – комплексной диэлектрической проницаемости ϵ , которая включает действительную ϵ' и мнимую ϵ'' части. В связи с этим георадиолокационные границы, в отличие от геоэлектрических, являются двухпараметрическими, так как зависят от двух электрофизических параметров среды.

А должны ли электротомографические границы совпадать с георадиолокационными? Ответ на этот вопрос до сих пор не является очевидным и требует обоснованного доказательства. Отдельно отметим, что речь идет именно о георадиолокационных и электротомографических границах, а не о геологических и петрофизических, которые, как доказано на практике, совпадают не всегда.

Рассмотрим пространственное положение георадиолокационных границ на примере комплексных 1D слоистых моделей сред, характеризующихся различными изменениями величин ρ и ϵ' . Георадиолокационное моделирование выполнено в программе MatGPR (Tzanis A., 2010).

2.2 Электро-георадиолокационные синтетические 1 D модели элементарных сред

Рассмотрим три простейших варианта совместных электро-георадиолокационных моделей (Глазунов В.В., Лаломов Д.А., 2016):

1. Однослойная модель с постоянными значениями УЭС и переменными значениями диэлектрической проницаемости.
2. Двухслойная модель с различными для каждого слоя значениями диэлектрической проницаемости и переменными значениями УЭС.
3. Двухслойная модель с равными для каждого слоя значениями диэлектрической проницаемости и переменными значениями УЭС.

Для каждого из трех вариантов моделей на радарограммах наблюдаются характерные особенности распространения электромагнитной волны.

Первый вариант модели

Однослойная модель с постоянными значениями УЭС и переменными значениями диэлектрической проницаемости (рисунок 2.2).

Модель с постоянными значениями ρ и переменными значениями диэлектрической проницаемости (рисунок 2.2). Физическим аналогом такой модели может являться стеклянный бак, на дне которого размещена алюминиевая пластина, являющаяся абсолютным рефлектором электромагнитных импульсов. Бак, на 24 см заполненный средой, ρ которой постоянна, а ϵ' изменяется с шагом 5 ед. в интервале от 5 до 30.

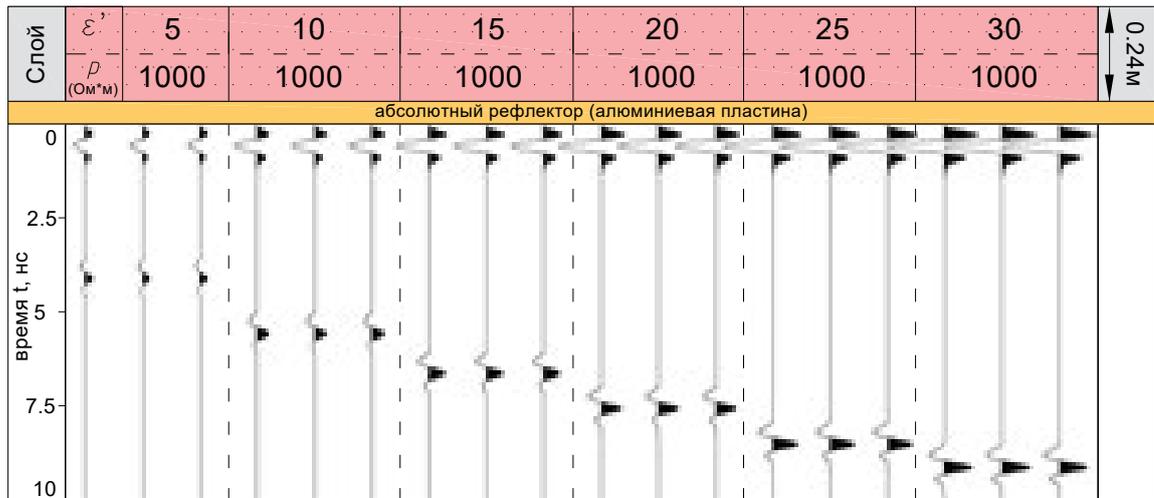


Рисунок 2.2 – Георадиолокационные модели однослойной среды с различными значениями ϵ' и с постоянными значениями мощности и ρ слоя

Особенности:

- с увеличением диэлектрической проницаемости время прихода отраженной волны увеличивается;
- прямая и отраженная от границы волна отличаются по фазе.

Второй вариант модели

Двухслойная модель с различными для каждого слоя значениями диэлектрической проницаемости и переменными значениями ρ . Физическим аналогом такой модели является бак, заполненный песком, перекрытым слоем воды, на дне которого лежит алюминиевая пластина (рисунок 3.9). Песок насыщен водой, минерализация которой M меняется от 0.03 до 2 г/л, что сказывается и на изменении ρ , а ϵ' слоев остается неизменной. Синтетическая модель такой комбинации ρ и ϵ' представлена на рисунке 2.3. Аналогичная физическая модель представлена на рисунке 3.17 и будет подробно рассмотрена в главе 3.

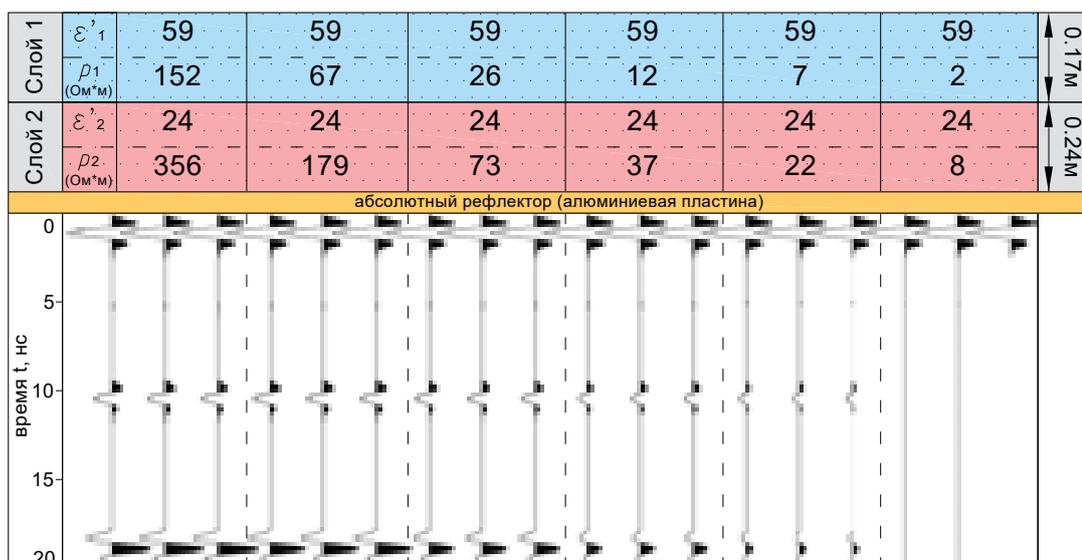


Рисунок 2.3 – Георадиолокационные модели двуслойной среды с различными для каждого слоя значениями диэлектрической проницаемости и переменными значениями УЭС

Модель на рисунке 2.4 демонстрирует случай, когда значения ρ слоев совпадают, а изменяется только ε' , и георадиолокационная граница образуется при отсутствии геоэлектрической.

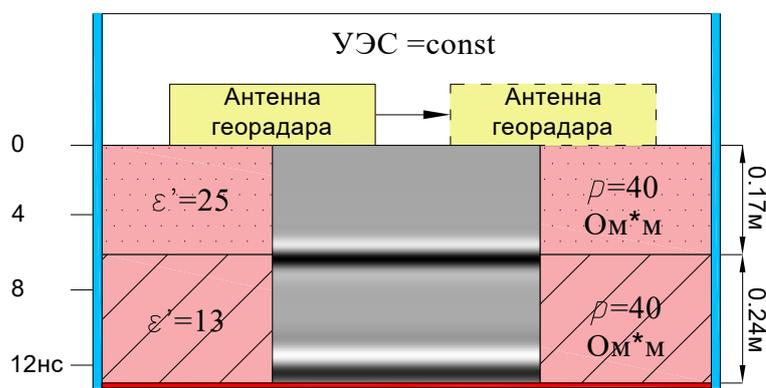


Рисунок 2.4 – Синтетическая георадиолокационная модель двуслойной среды с изменяющимися значениями ε' слоев при неизменном значении ρ

Особенности:

- с изменением ρ время прихода отраженной волны не изменяется;
- с изменением ρ амплитуда прямой волны остается постоянной;
- с уменьшением ρ наблюдается снижение амплитуды отраженной волны;
- при ρ верхнего < ρ нижнего и ε' верхнего > ε' нижнего прямая и отраженная волна синфазны, при ρ верхнего > ρ нижнего и ε' верхнего > ε' нижнего прямая и отраженная волна отличаются по фазе.

Третий вариант модели

Модель представлена двуслойной средой с постоянными значениями ϵ' , равными 24 для обоих слоев. Значения ρ слоев изменяются в интервале от 10 до 100 000. Рассмотрены два варианта взаимного расположения низкоомного и высокоомного слоя – когда низкоомный перекрывает высокоомный и наоборот (рисунок 2.5). Физические аналоги таких моделей в баке создать достаточно сложно, поэтому они не рассматриваются.

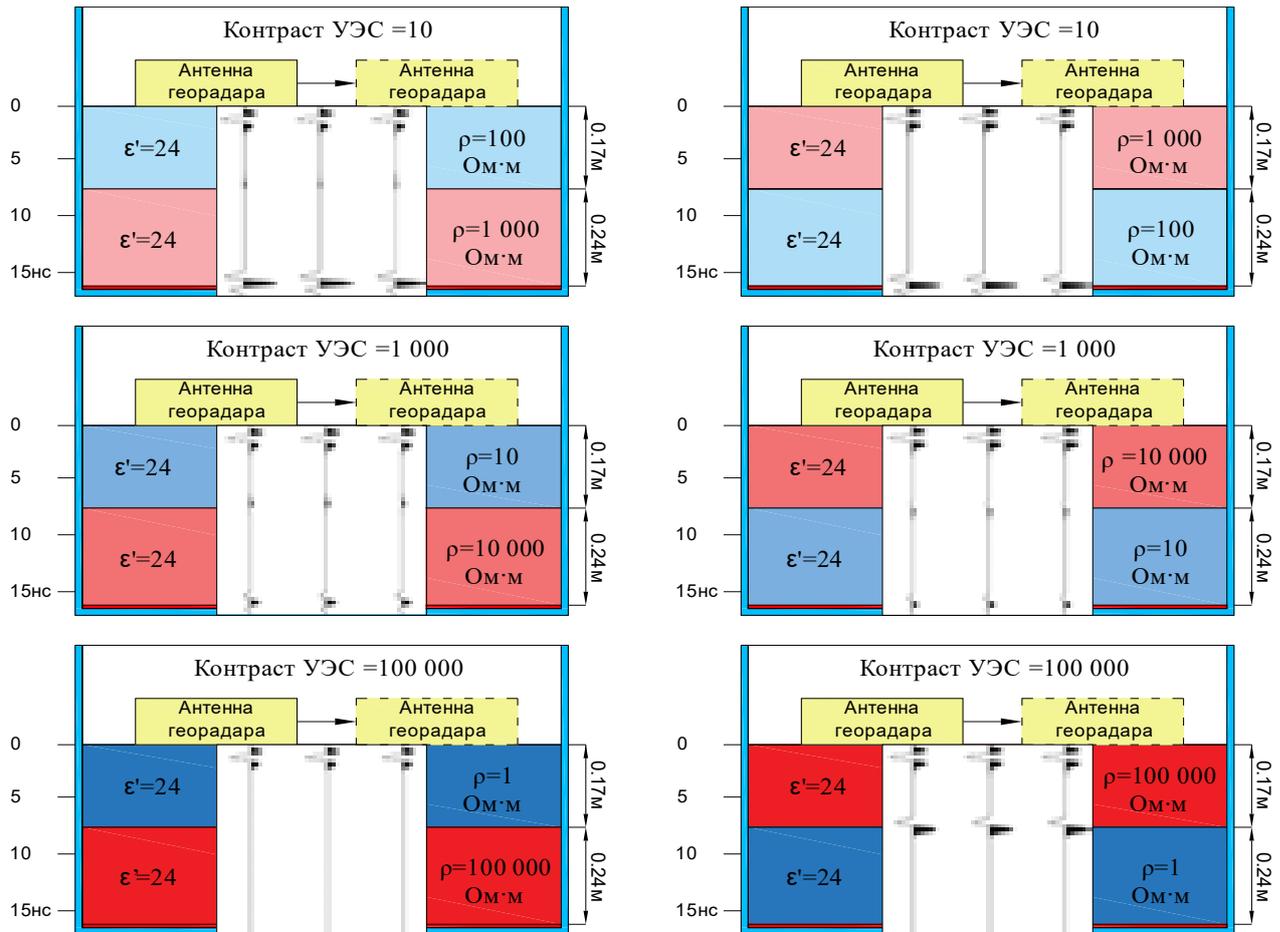


Рисунок 2.4 – Георадиолокационные модели двуслойной среды с различным пространственным соотношением слоев с различным ρ при $\epsilon' = \text{const}$

Особенности:

- на границах перехода ρ без изменения ϵ' формируется отраженная волна, по своей форме отличающаяся от прямой волны;
- наиболее ярко данная волна выражена при контрастном переходе от высокоомного к низкоомному слою;
- при смене пространственного соотношения высокоомного и низкоомного слоя наблюдается инверсия фазы волны, отраженной на границе слоев.

Выводы

Расчеты на простейших 1D моделях показали, что геоэлектрические и георадиолокационные границы пространственно совпадают. Однако георадиолокационные границы могут проявляться при отсутствии геоэлектрических границ, в средах значения ρ в пределах которых неизменны, величина ϵ' изменяется. Это объясняется зависимостью величины комплексной диэлектрической проницаемости от двух электрофизических параметров.

Таким образом, моделирование показало, что высококонтрастные геоэлектрические границы должны в той или иной степени отражаться на георадиограммах. Между тем, рассмотренные математические модели по своим электрофизическим характеристикам, в большинстве случаев, далеки от реальных геологических сред, поэтому обратимся к их возможным геологическим аналогам.

2.3 Электро-георадиолокационные синтетические 2D модели геологических сред

Совместная ГРЛ-ЭТ модель слоя глины на склоне скального основания перекрытого песчаной толщей

В качестве примера рассмотрим простейшую модель горизонтально-слоистой среды с контрастными электрофизическими параметрами ρ и ϵ' , геологическим аналогом которой может служить тонкий слой глины, залегающий на склоне скального основания и перекрытый песчаной толщей (рисунок 2.6).

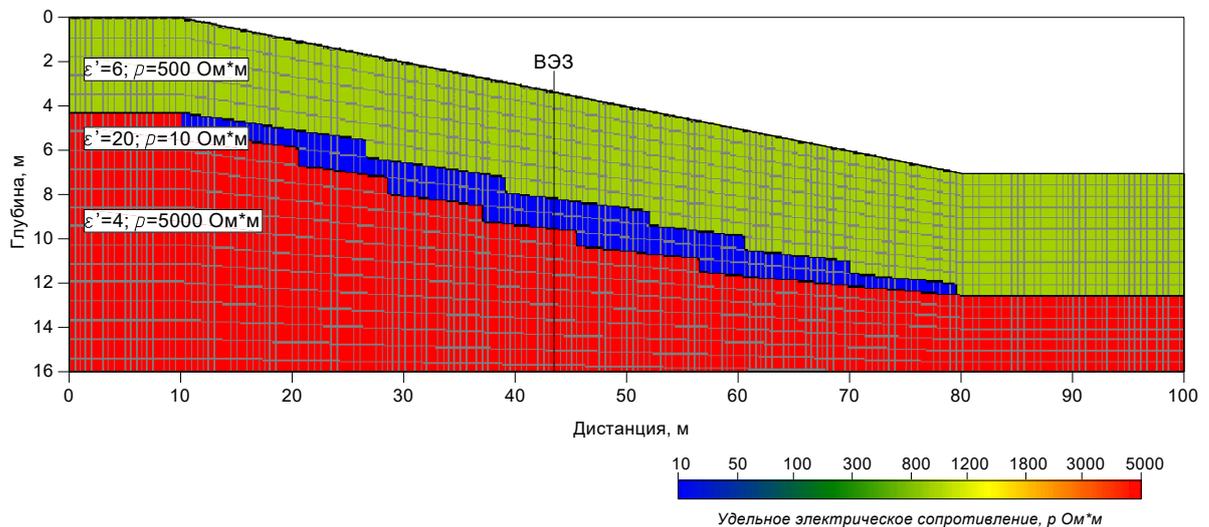


Рисунок 2.6 – Горизонтально-слоистая модель, представленная тонким слоем глины на склоне скального основания

Результат 2D инверсии по методу наименьших квадратов Оссам (Constable S.C. et. al. 1987), реализованному в программе ZondRes2D (Каминский А.Е., 2012), представлен на рисунке 2.7.

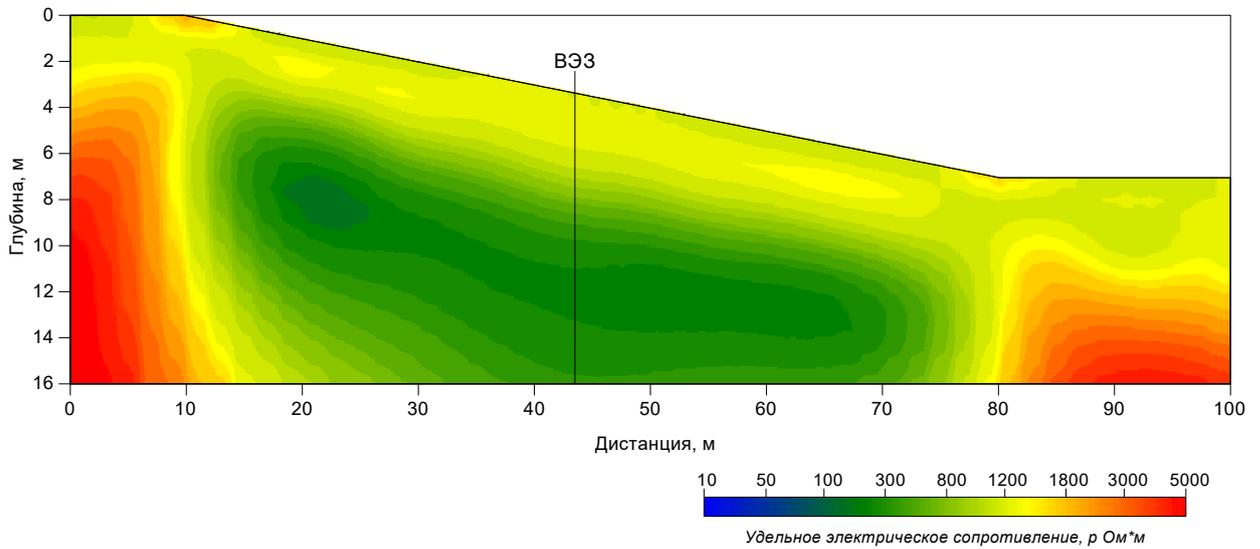


Рисунок 2.7 – Инверсионная ЭТ модель

Стоит отметить, что полученная инверсионная модель лишь отдаленно напоминает прототип, и ее геологическая интерпретация без априорных данных была бы ошибочна.

Проанализируем интересующую нас центральную часть модели в режиме одномерной интерпретации по классической методике ВЭЗ. Наблюдаемая трехслойная кривая ВЭЗ представлена на рисунке 2.8.

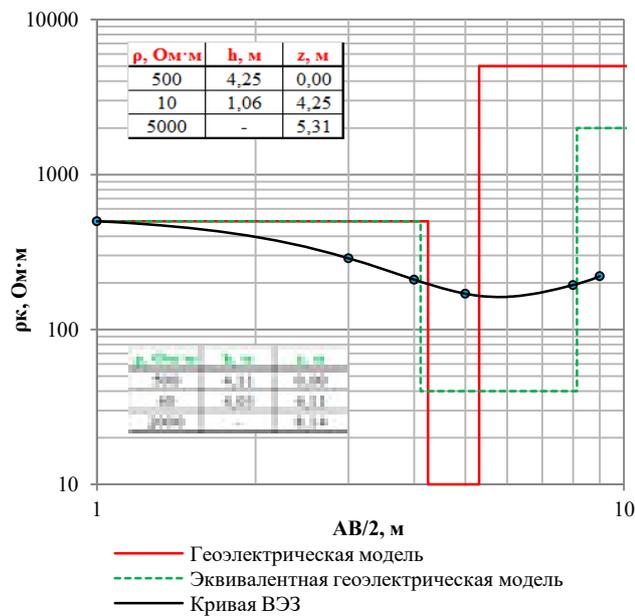


Рисунок 2.8 – Кривая ВЭЗ и эквивалентные геоэлектрические модели полученные на основе 1D интерпретации

Красным цветом обозначена геоэлектрическая модель, которая использовалась в качестве исходной при решении прямой и обратной задачи. Пунктирной линией изображена эквивалентная ей геоэлектрическая модель, характеризующаяся менее контрастными значениями УЭС слоев большей мощности, к которой стремится инверсионная электротомографическая модель, полученная со стандартными настройками инверсии.

На рисунке 2.9 представлена георадиолокационная модель во временном масштабе. Примечательно, что переход от скального основания к слою глины на георадиолокационном разрезе характеризуется сменой полярности отраженного сигнала. Георадиолокационная модель осложнена гиперболами дифракции.

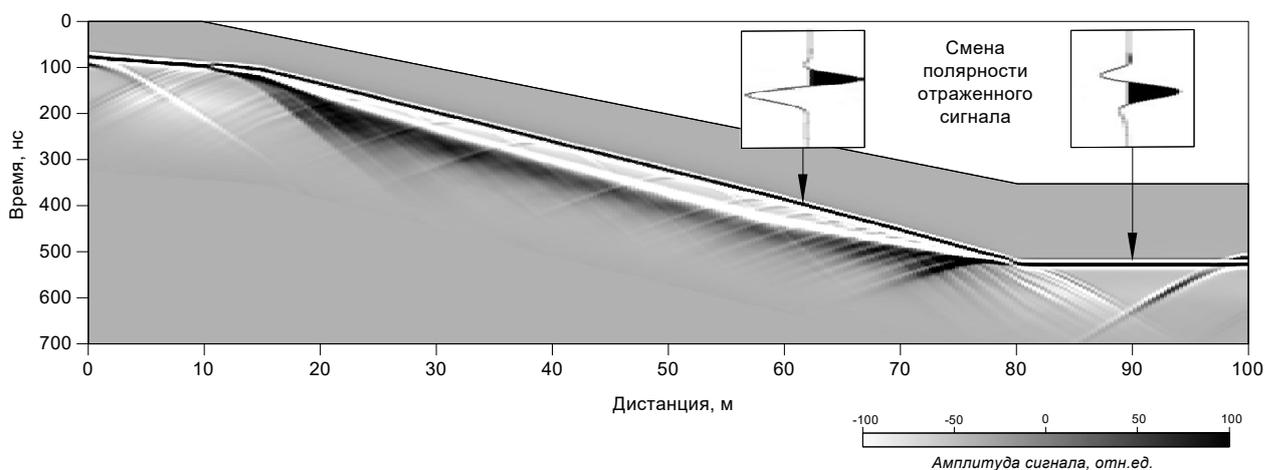


Рисунок 2.9 – Георадиолокационная модель во временном масштабе

На рисунке 2.10 представлена георадиолокационная модель в глубинном масштабе, полученная с учетом скоростей для каждого из слоев после применения процедуры F-K миграция Столта, реализованной в программе Prism (Инструкция ..., 2015).

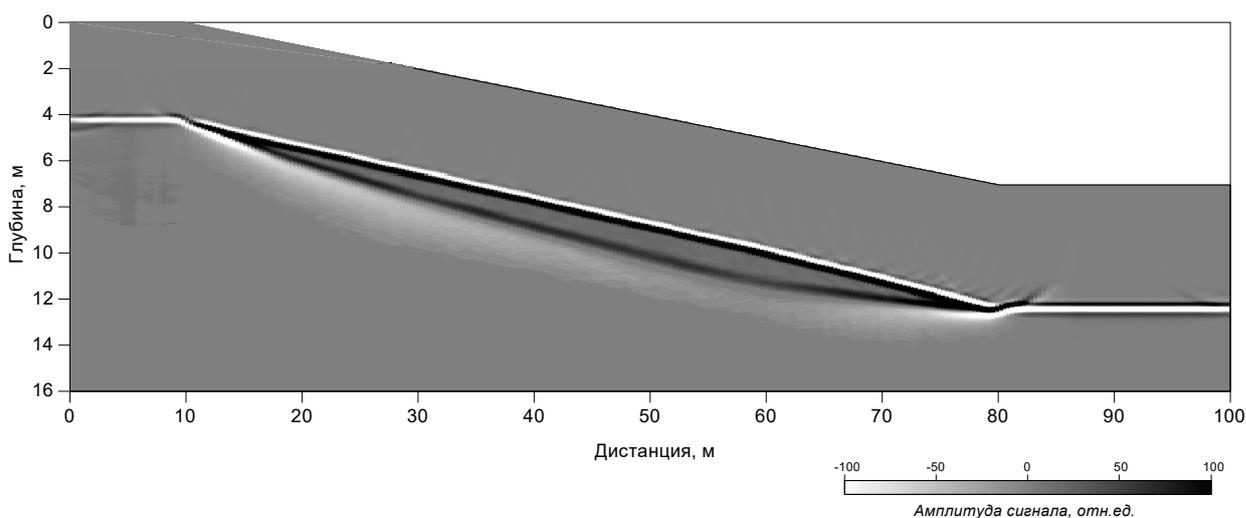


Рисунок 2.10 – Георадиолокационная модель в глубинном масштабе после применения процедуры F-K миграция Столта

На рисунке 2.11 представлена совмещенная георадиолокационно-электротомографическая модель.

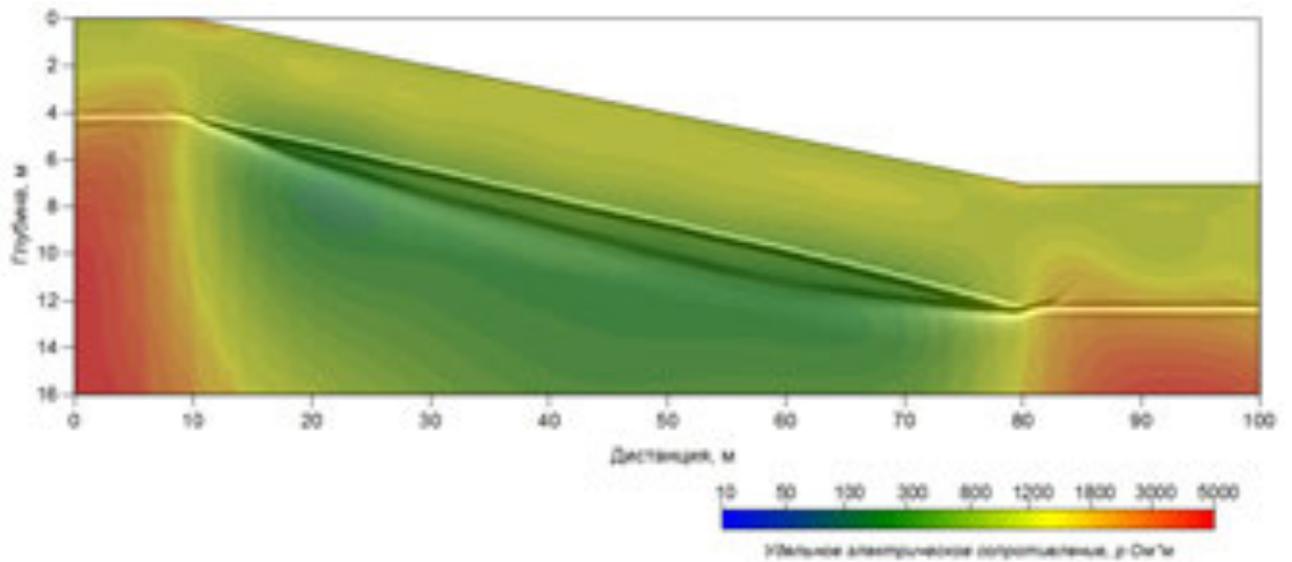


Рисунок 2.11 – Совмещенная ЭТ и ГРЛ модель

Недостатком данной модели, как уже отмечалось выше, являются размытые значения УЭС и явные противоречия между данными ГРЛ и ЭТ.

На рисунке 2.12 представлена совместная георадиолокационно-электротомографическая модель, полученная с использованием фокусирующей инверсии (Kaminsky A.E., Tarasov A.V., 2006) с закрепленными георадиолокационными границами.

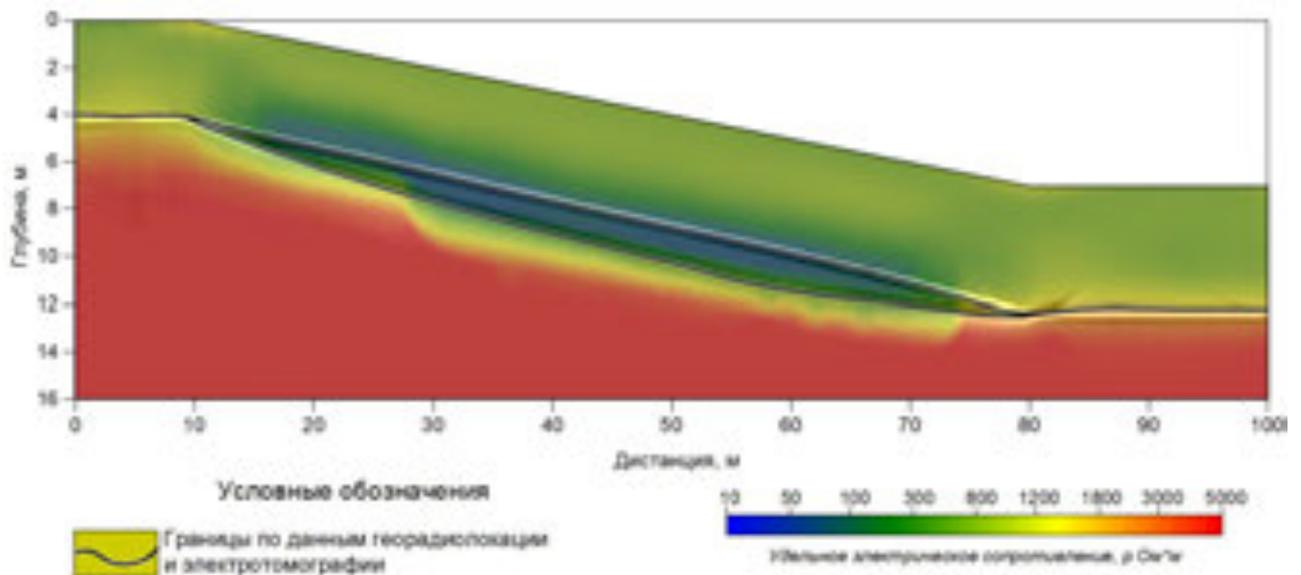


Рисунок 2.12 – Совместная ЭТ и ГРЛ модель

Описанный пример, полученный на основе моделирования, наглядно иллюстрирует ту ситуацию, когда, казалось бы, противоречащие друг другу данные ГРЛ и ЭТ были собраны в единую георадиолокационно-электротомографическую модель и гармонично дополнили друг друга. Пример косвенно доказывает, что георадиолокационные и электротомографические границы, являющиеся отражением строения реальных геологических сред, не должны противоречить друг другу.

Кроме того, полученная модель в соответствии с терминологией Никитина А.А. (Никитин А.А., Хмелевской В.К., 2004) является согласованной, так как за ее основу взята геометрия исследуемой среды, полученная по данным георадиолокации, а физическая характеристика метода электротомографии, которой является УЭС, подобрана с учетом ее латеральной и вертикальной изменчивости.

Совместная ГРЛ-ЭТ модель торфяных отложений, залегающих на гранитном основании

В качестве другого наглядного примера рассмотрим модель часто встречающейся инженерно-геологической ситуации, когда залегающее на гранитном основании минеральное дно небольшой мощности перекрыто торфяными отложениями (рисунок 2.13).

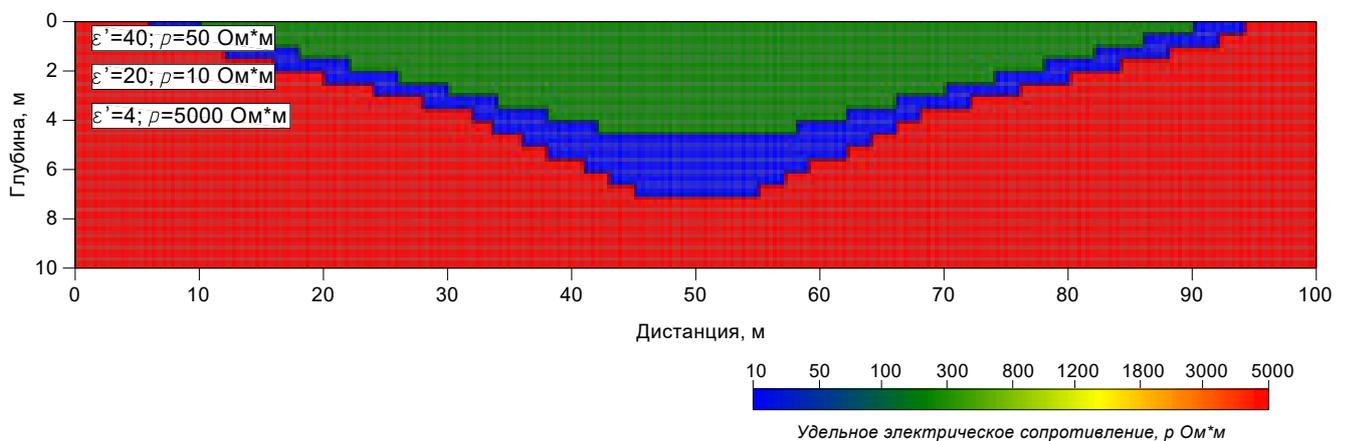


Рисунок 2.13 – Модель торфяных отложений, подстилаемых минеральным дном небольшой мощности на гранитном основании

На рисунках 2.13 – 2.18 представлены основные этапы получения согласованной георадиолокационно-электротомографической модели, рассчитанной на основе данного примера.

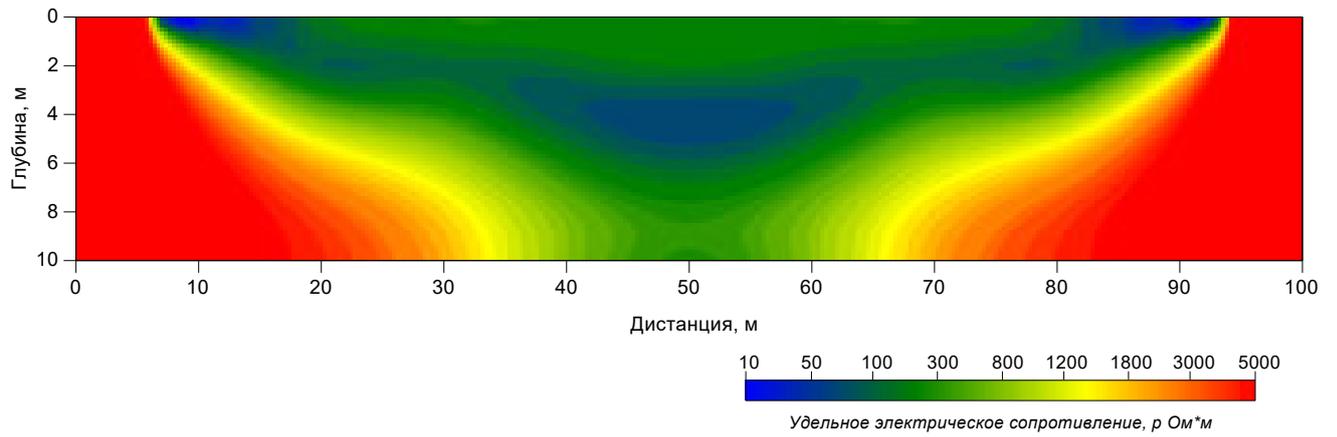


Рисунок 2.14 – Инверсионная ЭТ модель

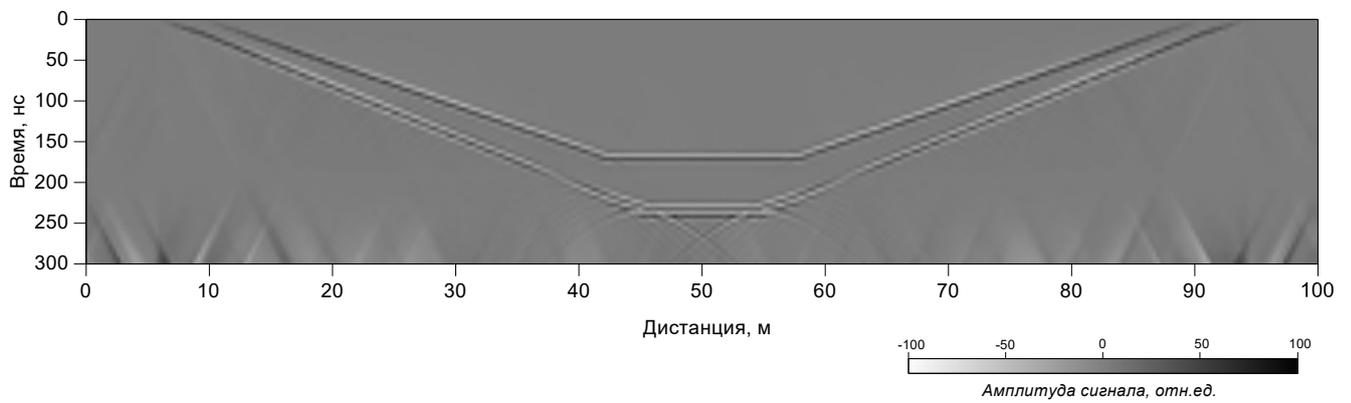


Рисунок 2.15 – Георадиолокационная модель во временном масштабе

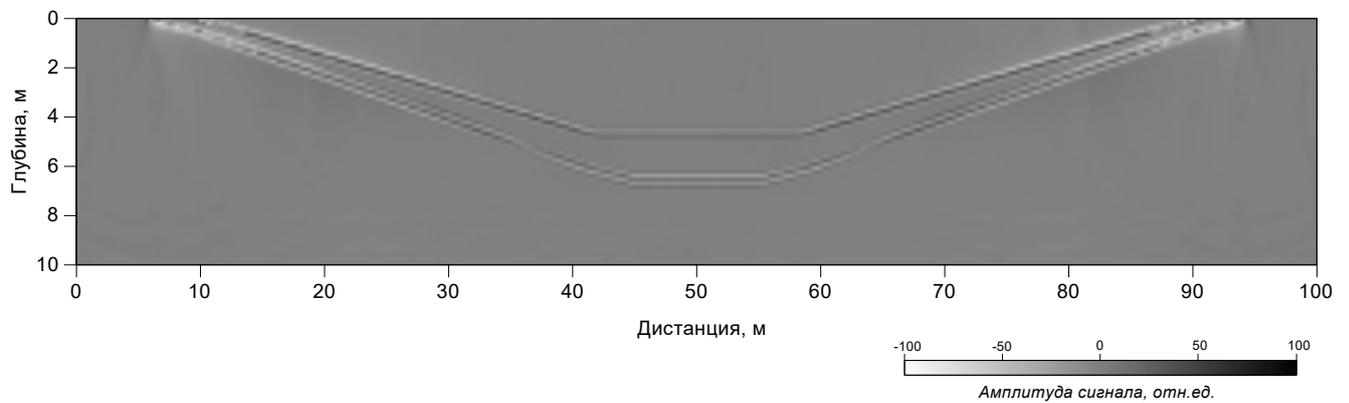


Рисунок 2.16 – Георадиолокационная модель в глубинном масштабе после применения процедуры миграции

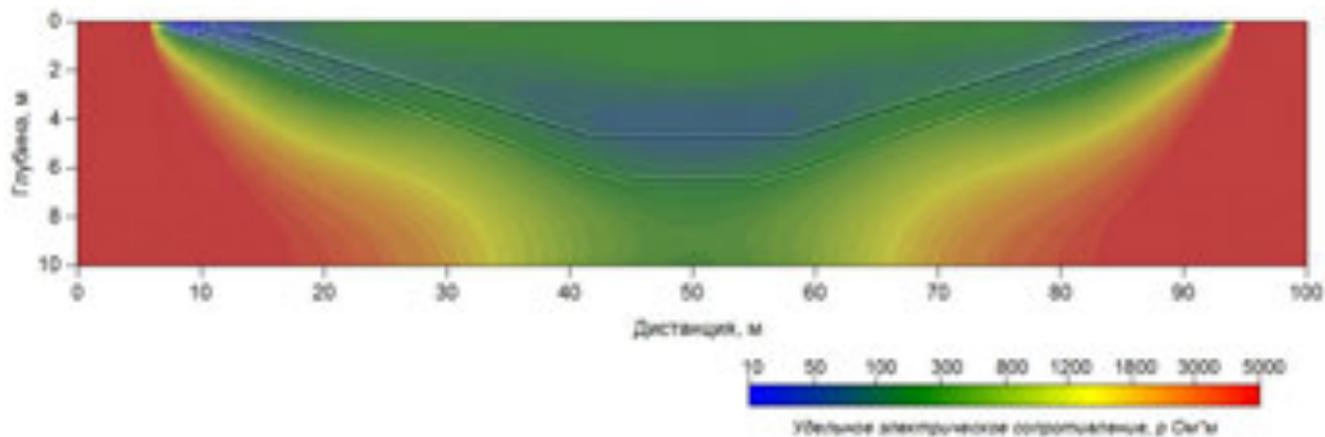


Рисунок 2.17 – Совмещенная ЭТ и ГРЛ модель

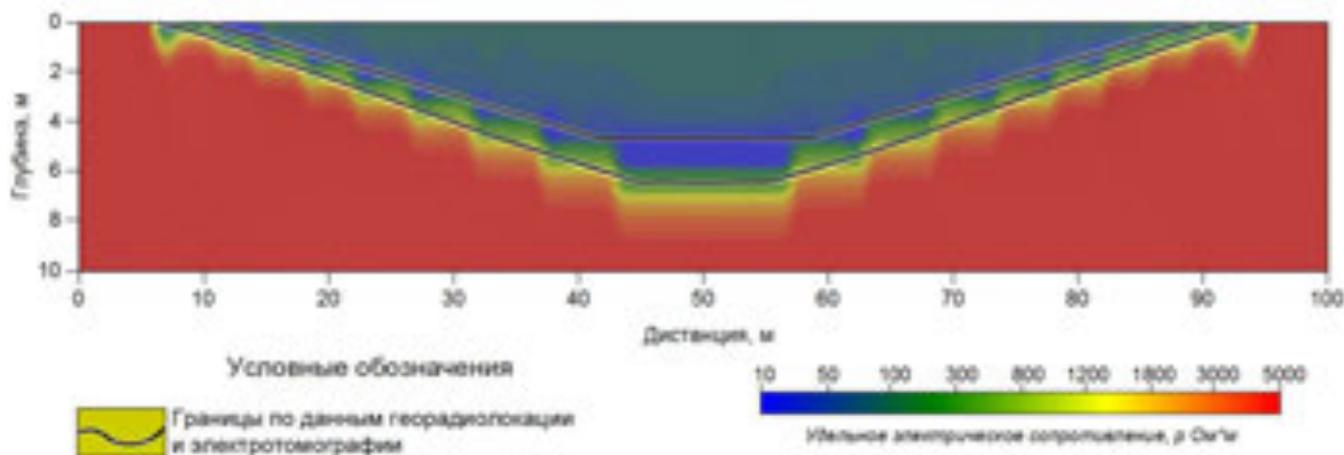


Рисунок 2.18 – Совместная ЭТ и ГРЛ модель

При получении георадиолокационного разреза выполнена 2-D Split-step Fourier миграция (Stoffa P.L. et al., 1990), реализованная в программе MatGPR (Tzanis A., 2010).

По аналогии с предыдущим примером на расчет электротомографической модели существенное влияние оказывает принцип эквивалентности. Фокусирующая инверсия по георадиолокационным границам позволяет снизить это влияние.

Совместная ГРЛ-ЭТ модель контакта глинистых грунтов со скальным основанием

На рисунках 2.19 представлен пример модели крутопадающего контакта глинистых грунтов со скальным основанием.

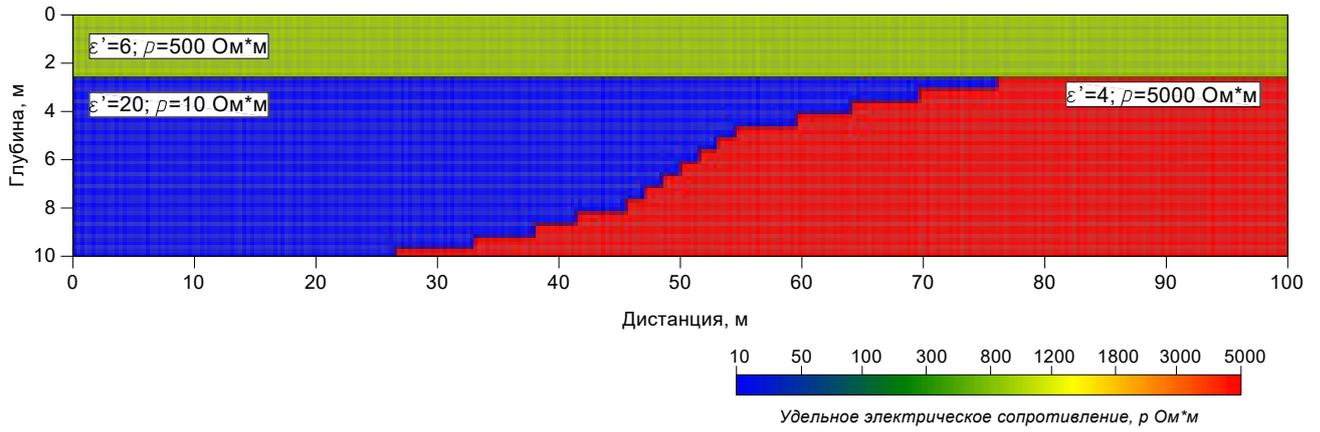


Рисунок 2.19 – Модель крутопадающего контакта глинистых грунтов со скальным основанием

На рисунках 2.20 – 2.24 представлены основные этапы получения согласованной георадиолокационно-электротомографической модели, рассчитанной на основе данного примера.

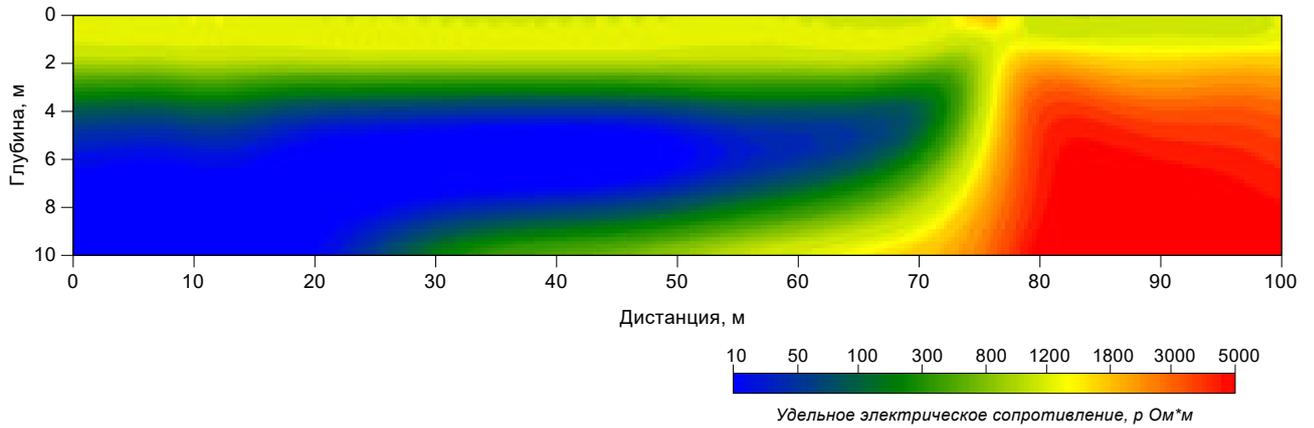


Рисунок 2.20 – Инверсионная ЭТ модель

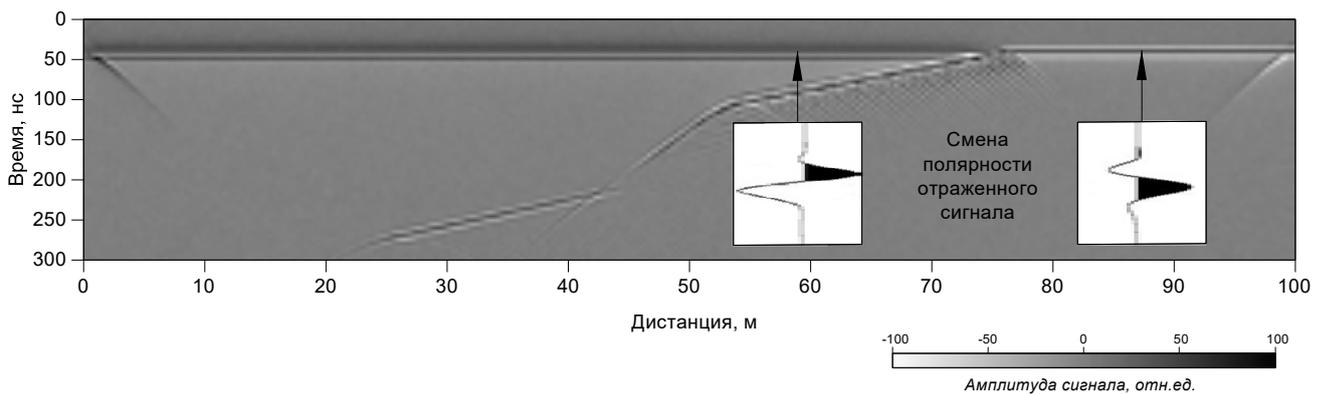


Рисунок 2.21 – Георадиолокационная модель во временном масштабе

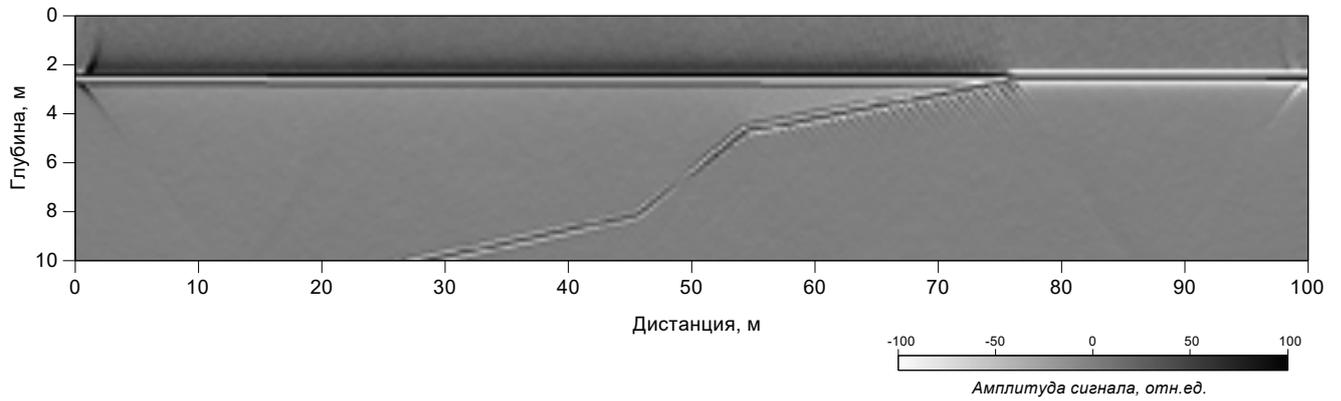


Рисунок 2.22 – Георадиолокационная модель в глубинном масштабе после применения процедуры миграции

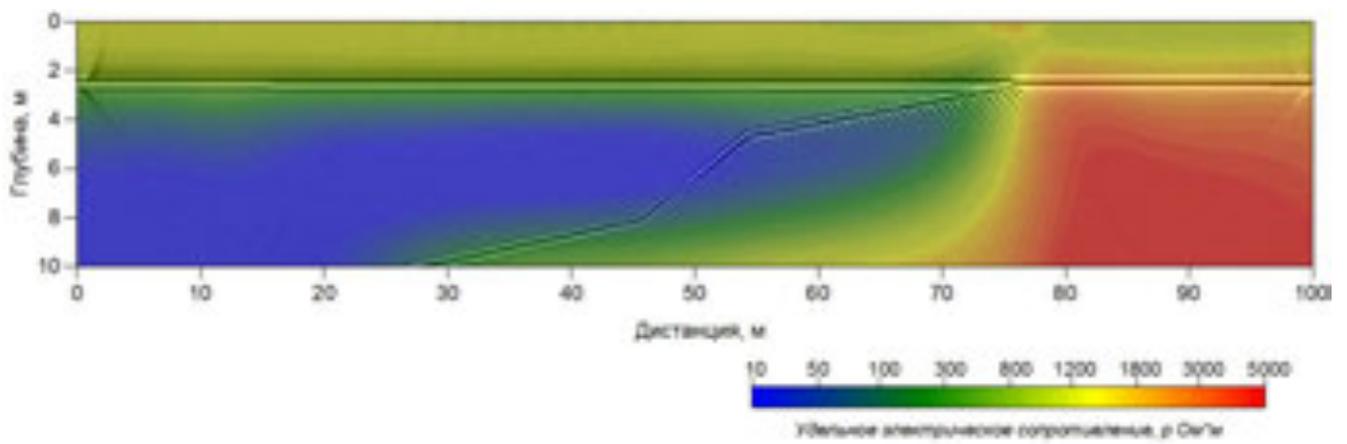


Рисунок 2.23 – Совмещенная ЭТ и ГРЛ модель

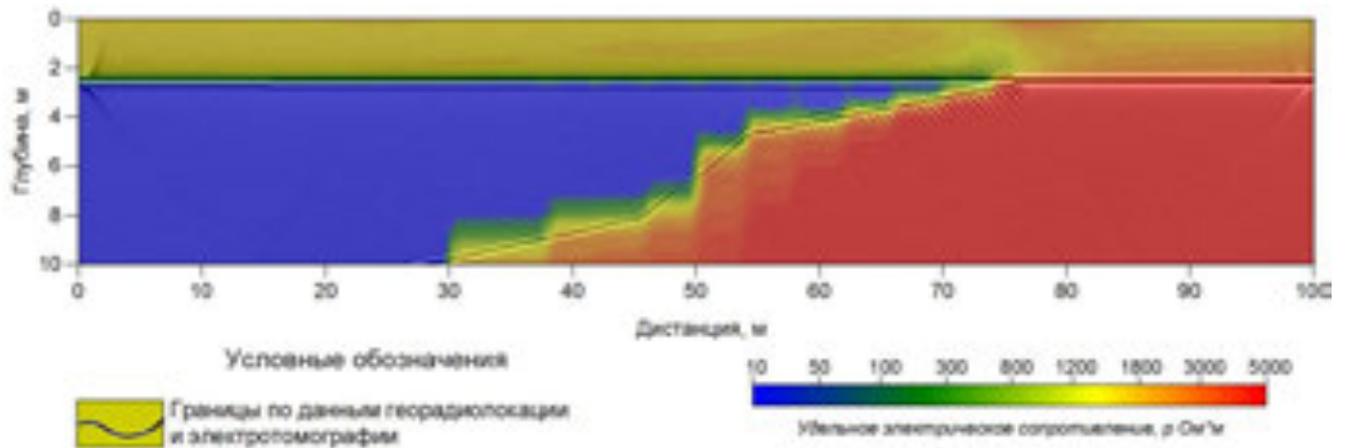


Рисунок 2.24 – Совместная ЭТ и ГРЛ модель

При получении георадиолокационного разреза выполнена Т-К миграция во временной волно-числовой области, реализованная в программе RadexPro (Руководство ..., 2016). Основным преимуществом этого метода является его высокая точность для случая

крутопадающих и даже переворачивающихся отражающих горизонтов и скоростей, изменяющихся с глубиной.

Данный пример также демонстрирует эффективность фокусирующей инверсии по георадиолокационным границам.

2.4 Электро-георадиолокационные натуральные 2 D модели геологических сред

Рассмотрим практические примеры сопоставления георадиолокационных и электротомографических данных, полученных в рамках исследований различных инженерно-геологических разрезов.

Пример 1

На рисунке 2.25 приведена радарограмма, полученная на песчано-глинистом разрезе.

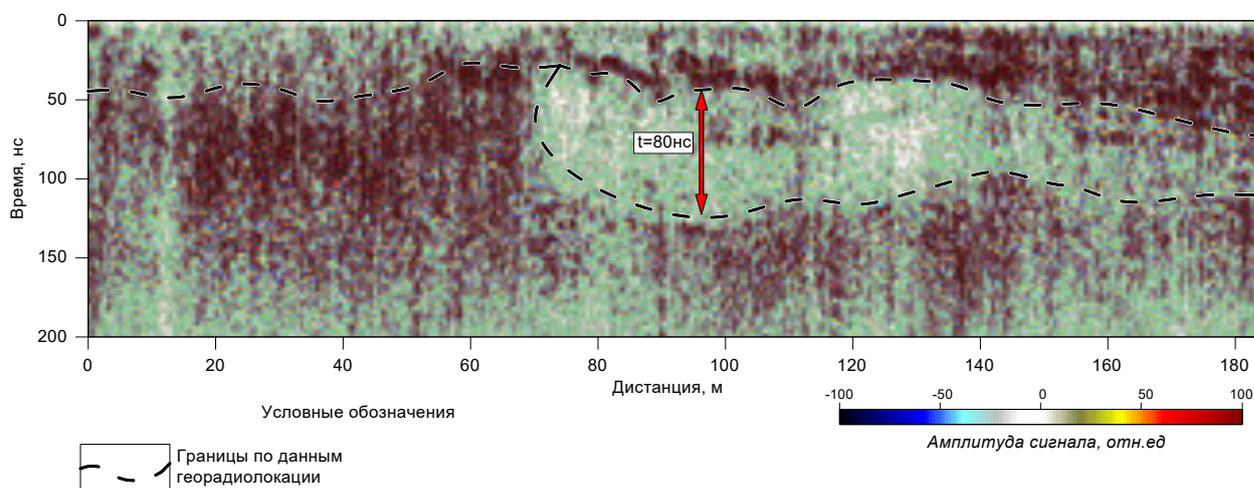


Рисунок 2.25 – Радарограмма, полученная на песчано-глинистом разрезе

На радарограмме в центральной ее части на интервале от 40 до 120 нс, главным образом по волновой картине, прослеживается протяженная область с относительно низкой амплитудой отраженного сигнала. Причем ниже 120 нс вновь наблюдаются интенсивные отражения.

Контрольное бурение по одной из скважин на глубине 1.1 м вскрыло толщу глины, перекрывающую слой суглинка. Другая скважина (в левой части разреза) показала, что данный слой глины дальше по разрезу выклинивается (рисунок 2.26).

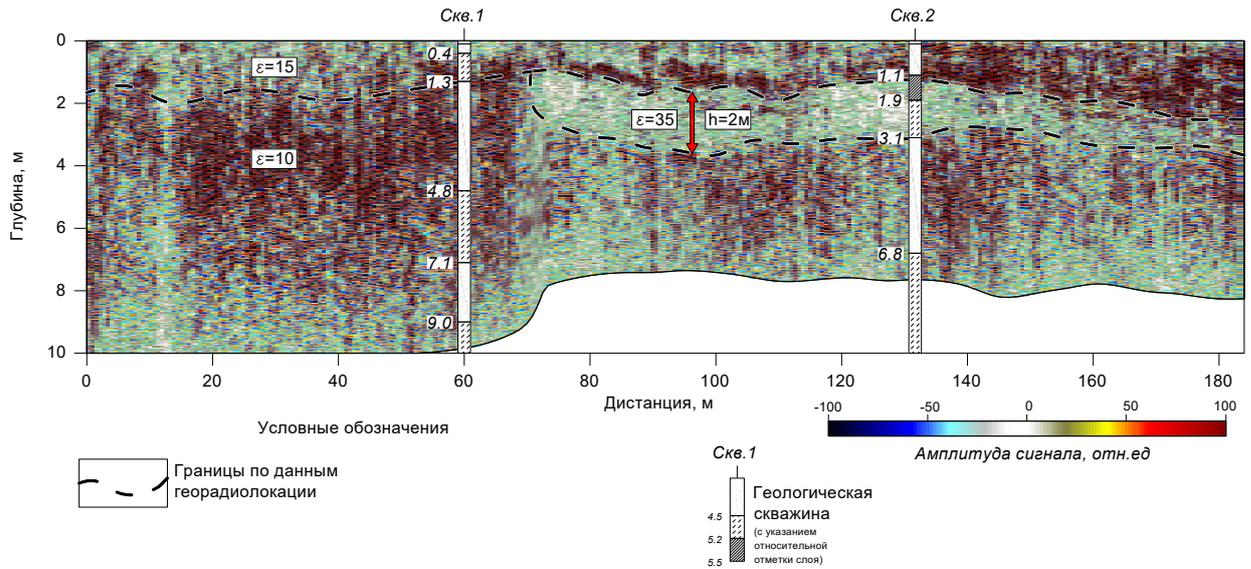


Рисунок 2.26 – Георадиолокационный разрез в глубинном масштабе с геологической привязкой

Таким образом, априорная информация о строении геологического разреза по данным бурения позволила выполнить послойную интерпретацию георадиолокационных данных и перейти от временного разреза к глубинному (рисунок 2.26).

Электротомографическая модель по тому же профилю приведена на рисунке 2.27. В результате инверсии по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора Smoothness constrained (Каминский А.Е., 2012) получено гладкое (без резких границ) и устойчивое распределение параметров УЭС инверсионной модели.

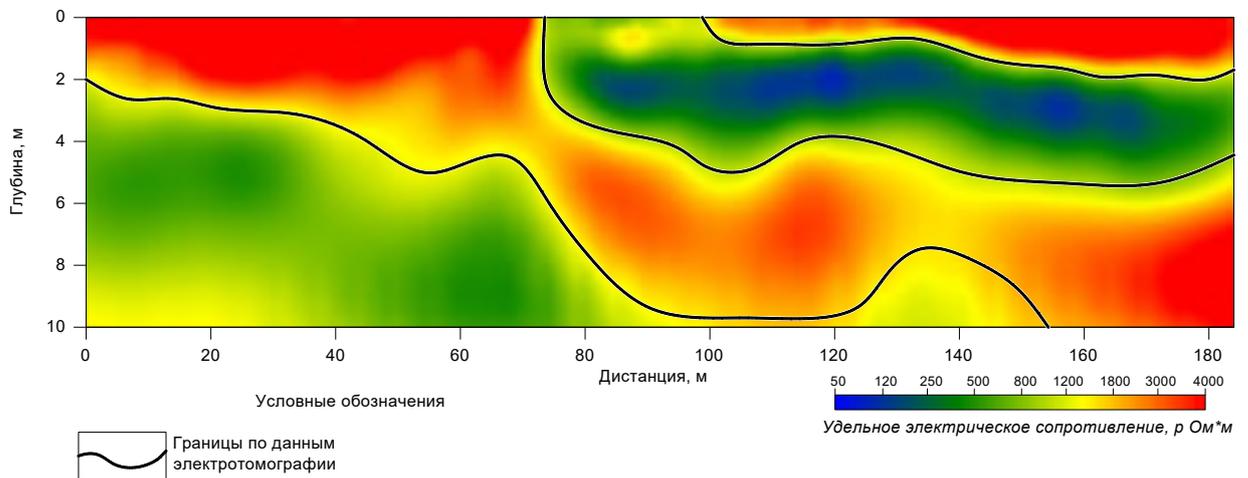


Рисунок 2.27 – Электротомографическая модель

Следующий этап совместной обработки заключался в фокусирующей инверсии электротомографических данных по заранее выделенным георадиолокационным границам. При инверсии данных электротомографии использован фокусирующий фильтр, построенный на

основе информации о пространственном положении границы линзы глинистых грунтов. Результирующая электротомографическая модель приведена на рисунке 2.28.

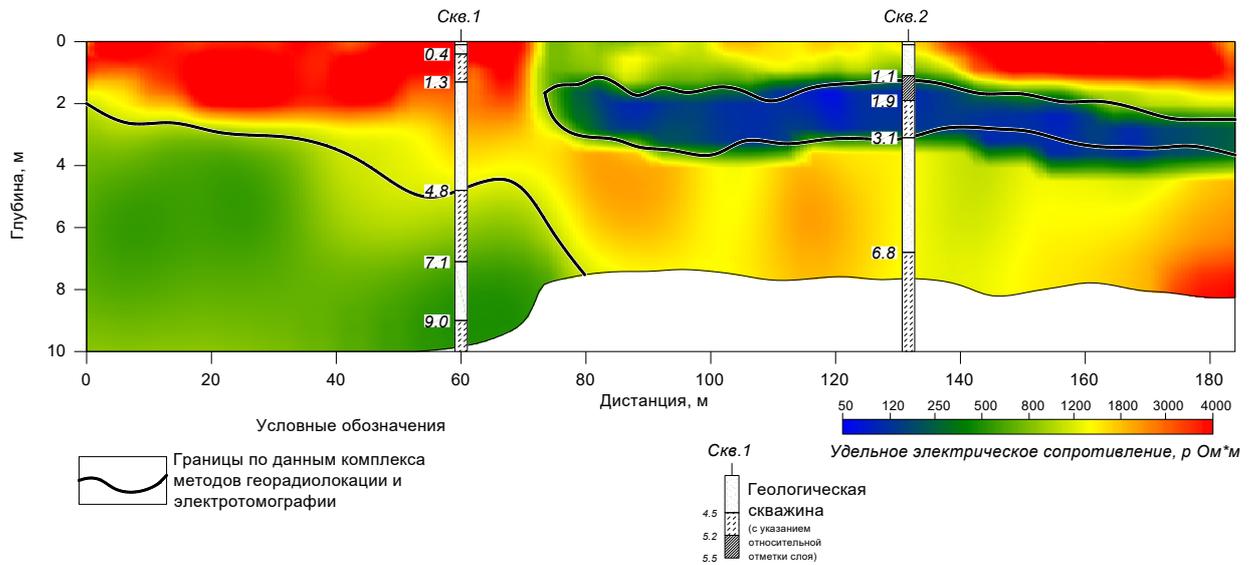


Рисунок 2.28 – Электротомографическая модель после фокусирующей инверсии по георадиолокационным границам

Прослой глины и суглинка на электротомографической модели локализовался как по своим пространственным очертаниям, так и по значениям УЭС.

На рисунке 2.29 представлена совместная георадиолокационно-электротомографическая модель с результатами интерпретации, подтвержденными данными бурения.

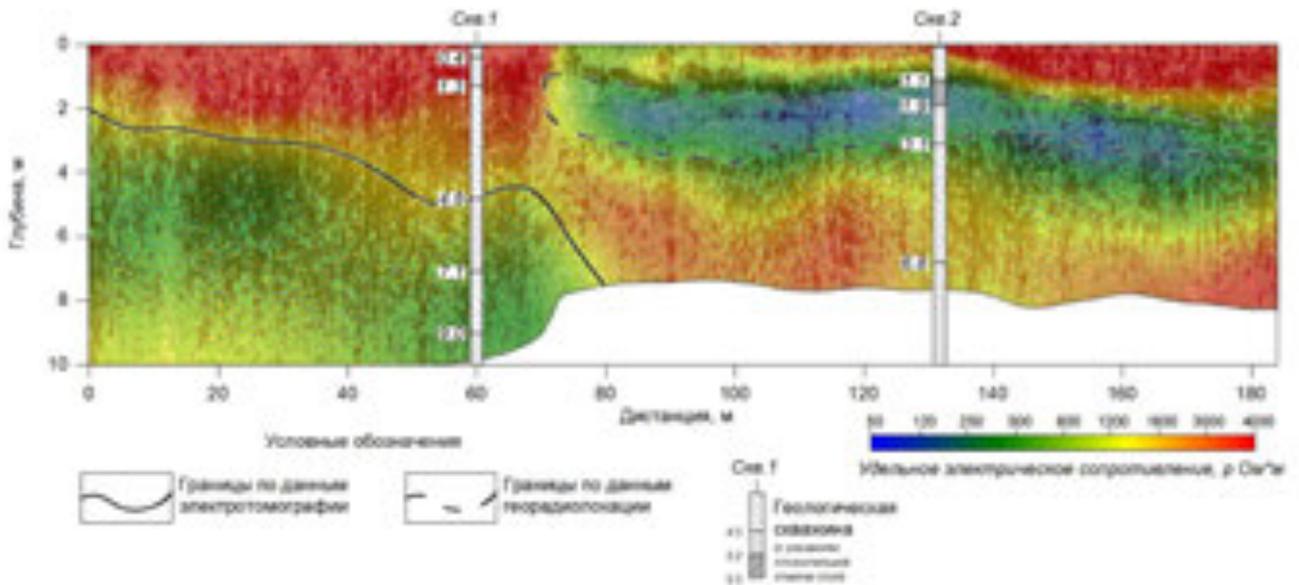


Рисунок 2.29 – Георадиолокационно-электротомографическая модель с совместной интерпретацией

Следует отметить, что данный пример является показательным с точки зрения демонстрации практической эффективности совместного использования данных георадиолокации и электротомографии. Во-первых, была выполнена послойная интерпретация георадиолокационных данных, которая позволила установить пространственное положение георадиолокационных границ, не противоречащих геологическим данным, что не было очевидно на временном георадиолокационном разрезе. Закрепление границ при инверсии электротомографической модели позволило локализовать низкоомный слой, подтвердив тем самым его литологическое отношение к низкоомным глинам и суглинкам. Кроме того, после выполнения вышеописанных процедур обработки, результаты интерпретации перестали противоречить геологическим данным, что является, пожалуй, основной практической ценностью дополнительной информации о детальном строении геологического разреза, получаемой на основе геофизических исследований.

Рассмотренный пример наглядно показал, что область затухания электромагнитной волны, наблюдаемая на радарограмме, связана с низкоомной линзой глин.

Пример 2

Объектом исследований данного примера являлся песчано-глинистый разрез с гравием, галькой и валунами. Особенностью разреза является то, что в центральной его части обнаружены выходы гранитов на дневную поверхность.

Радарограмма во временном вертикальном масштабе, полученная на данном разрезе с выделенными георадиолокационными границами, представлена на рисунке 2.30. В центральной части радарограммы по характерной волновой картине на временном интервале 90 нс четко прослеживается объект шириной более 8 м.

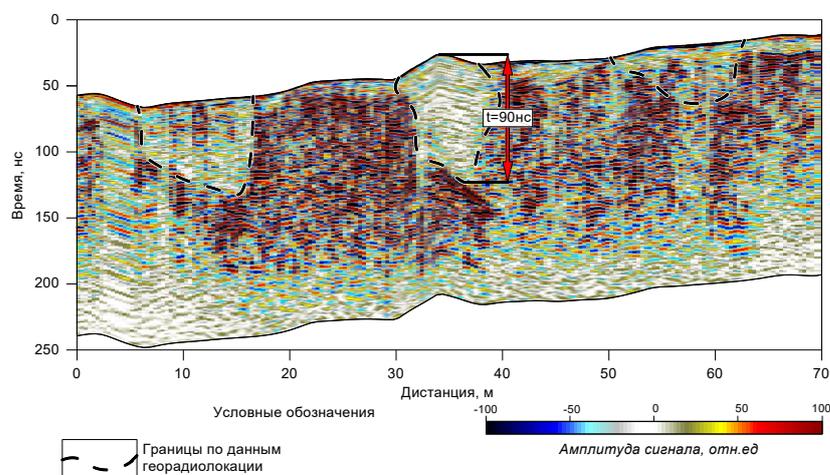


Рисунок 2.30 – Радарограмма, полученная на песчано-глинистом разрезе, осложненном гранитными валунами

На рисунке 2.31 представлена радарограмма в глубинном вертикальном масштабе после послойной интерпретации с вынесенными геологическим скважинами.

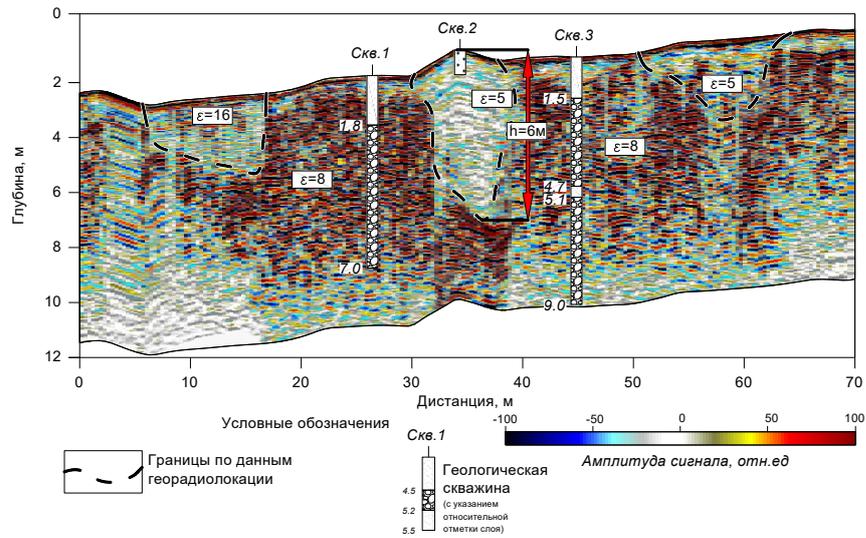


Рисунок 2.31 – Георадиолокационный разрез в глубинном масштабе с геологической привязкой

Электротомографическая модель по тому же профилю приведена на рисунке 2.32. По аналогии с примером 1 получено гладкое (без резких границ) и устойчивое распределение параметров УЭС инверсионной модели.

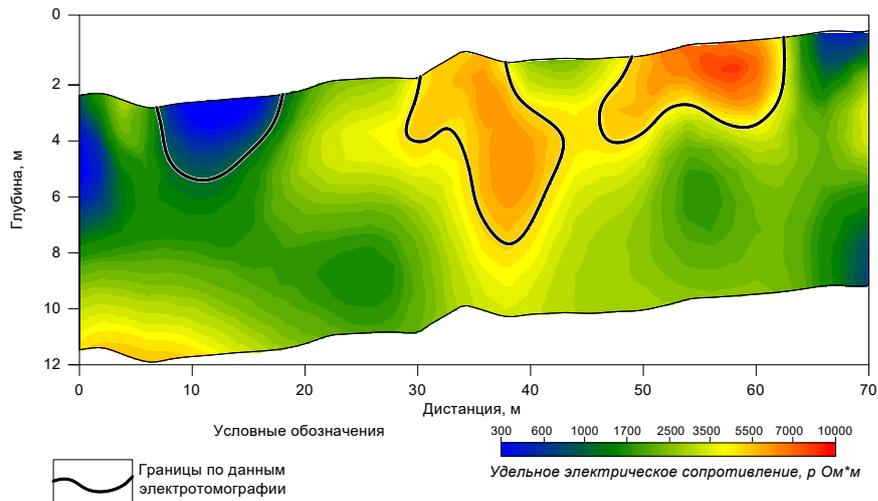


Рисунок 2.32 – Электротомографическая модель

Электротомографическая модель после фокусирующей инверсии по закрепленным георадиолокационным границам приведена на рисунке 2.33.

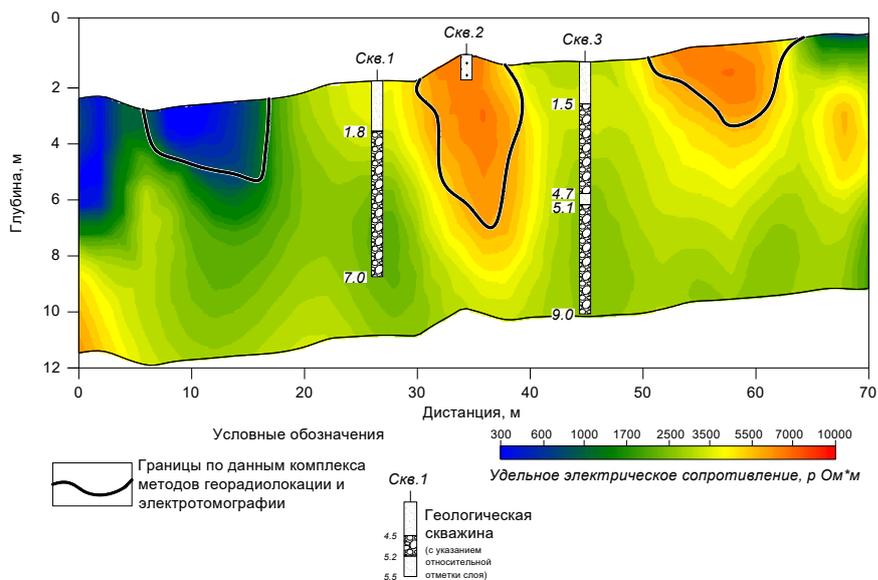


Рисунок 2.33 – Электротомографическая модель после фокусирующей инверсии по георадиолокационным границам

На рисунке 2.34 представлена совместная георадиолокационно-электротомографическая модель с результатами интерпретации, подтвержденными данными бурения.

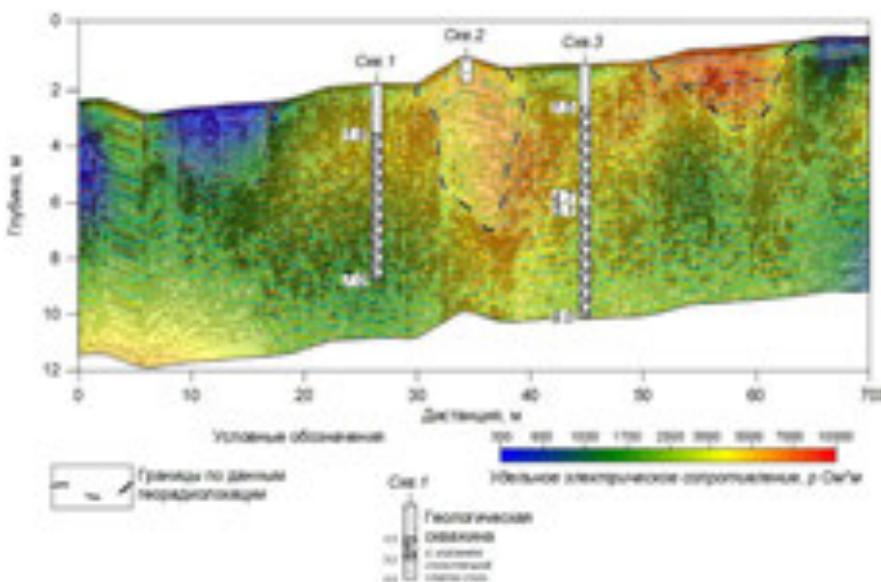


Рисунок 2.34 – Совместная георадиолокационно-электротомографическая модель

В данном примере следует отметить, что инженерно-геологический разрез, в отличие от разреза из примера 1, не был горизонтально-слоистым и был представлен гораздо более контрастными значениями УЭС. Данная особенность отразилась в достаточно однозначной геологической интерпретации данных ЭТ. Закрепленные георадиолокационные границы позволили лишь незначительно подкорректировать геометрию инверсионной ЭТ модели. Однако

полученные значения УЭС позволили однозначно разделить радиопрозрачную область и область повышенного затухания на радарограмме.

Пример 3

Объектом исследований, описанном в данном примере, являлся разрез отложений торфа, залегающих на гранитном основании различной степени трещиноватости.

На рисунке 2.35 приведена радарограмма, полученная на данном разрезе. В отложениях торфа на радарограмме проявлена яркая гипербола дифракции, анализ гиперболы дал возможность определить значение диэлектрической проницаемости для данного слоя, которое составило 40 ед.

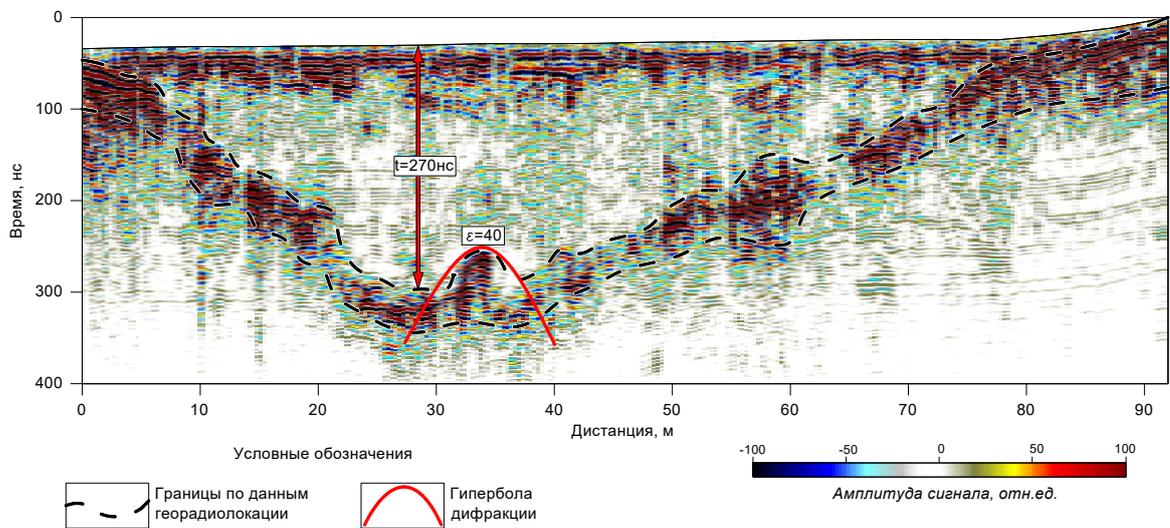


Рисунок 2.35 – Радарограмма, полученная на торфяных отложениях на гранитном основании

Кроме того, на участке выполнено заверочное бурение и динамическое зондирование, на основе которого проведена геологическая интерпретация геофизических данных и переход из временного разреза в глубинный (рисунок 2.36). По данным бурения и динамического зондирования в основании торфа установлен маломощный прослой песка, который также хорошо выделяется по характерной волновой картине георадиолокационной записи.

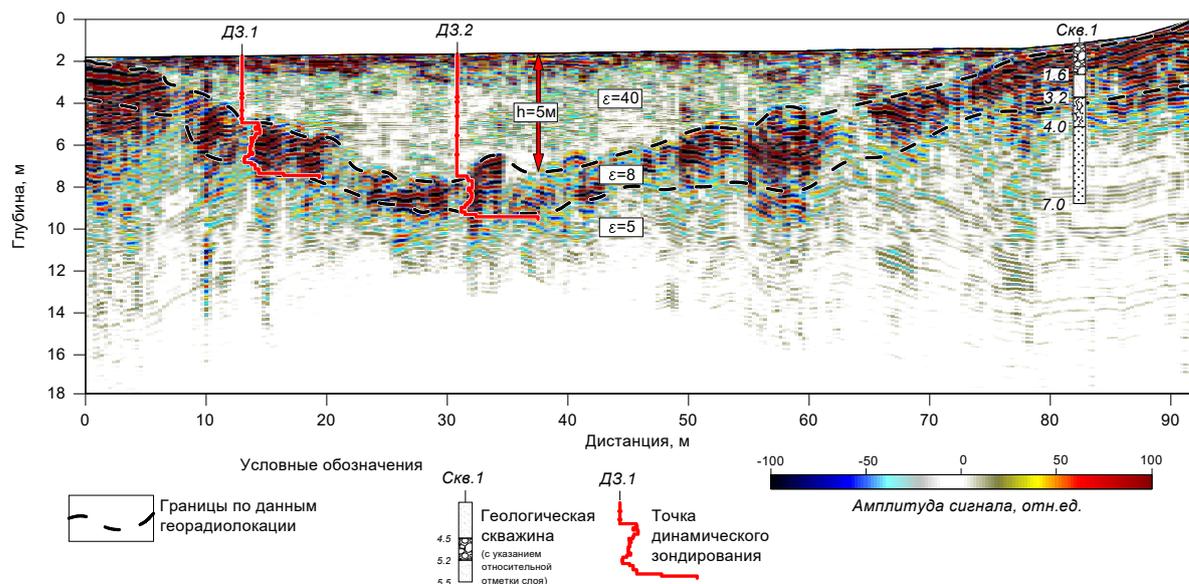


Рисунок 2.36 – Георадиолокационный разрез в глубинном масштабе с геологической привязкой

На рисунке 2.37 представлена геологическая интерпретации данных электротомографии по тому же профилю. Прослой песка на электротомографической модели не выделяется, зато в гранитном основании по относительно низким значениям УЭС выделяются зоны трещиноватости.

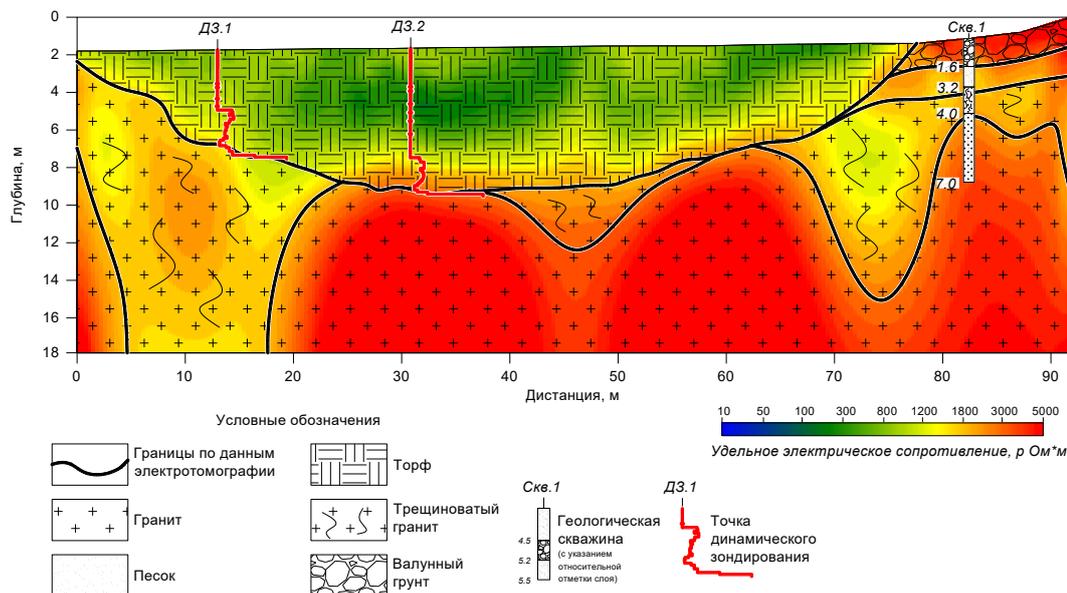


Рисунок 2.37 – Электротомографическая модель

Совместная георадиолокационно-электротомографическая модель приведена на рисунке 2.38. Интересной особенностью, которую можно наблюдать на совместной модели, является корреляция относительно низкоомных областей, соответствующих трещиноватому граниту с изменением волновой георадиолокационной картины. Если высокоомным областям

монолитного гранита отвечает полностью радиопрозрачная запись, то относительно низкоомные участки трещиноватого гранита характеризуются реверберацией электромагнитной волны (Данильев С.М., 2011).

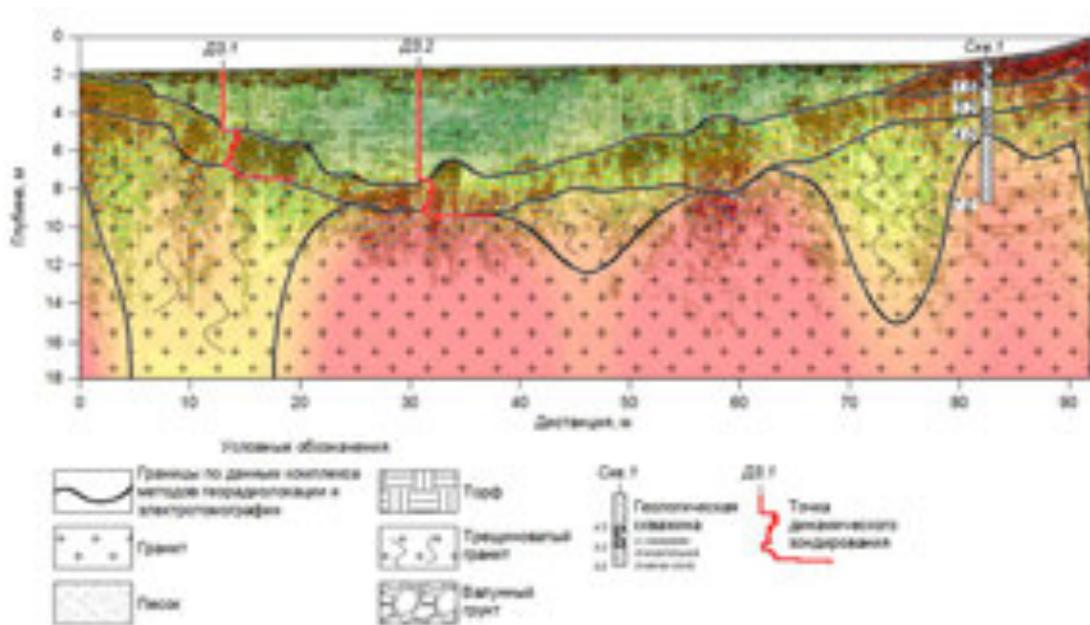


Рисунок 2.38 – Георадиолокационно-электротомографическая модель с совместной интерпретацией

Описанный пример показывает эффективность комплексного использования методов ГРЛ и ЭТ в сложных инженерно-геологических условиях. В результате совместной интерпретации геофизических данных с учетом априорной геологической информации получена согласованная модель, отражающая основные особенности геологического строения участка.

2.5 Эквивалентность моделей структуры волнового электромагнитного поля

Согласно известной классификации В.В. Глазунова все грунты на основе их электрофизических свойств подразделяются на радиопрозрачные, радиопоглощающие и экранирующие. Каждая из данных групп грунтов на радарограммах характеризуется своеобразной волновой картиной. Результаты полевых исследований, представленные в практических примерах данной работы, очередной раз показали, что радиопрозрачные и экранирующие среды на георадарограммах имеют одинаковую структуру волнового электромагнитного поля, характеризующуюся низкоамплитудным отраженным сигналом. Таким образом их однозначное разделение методом георадиолокации возможно только в комплексе с методами сопротивления на основе измерений электропроводности. Данное утверждение наглядно проиллюстрировано на рисунках 2.39 и 2.40.

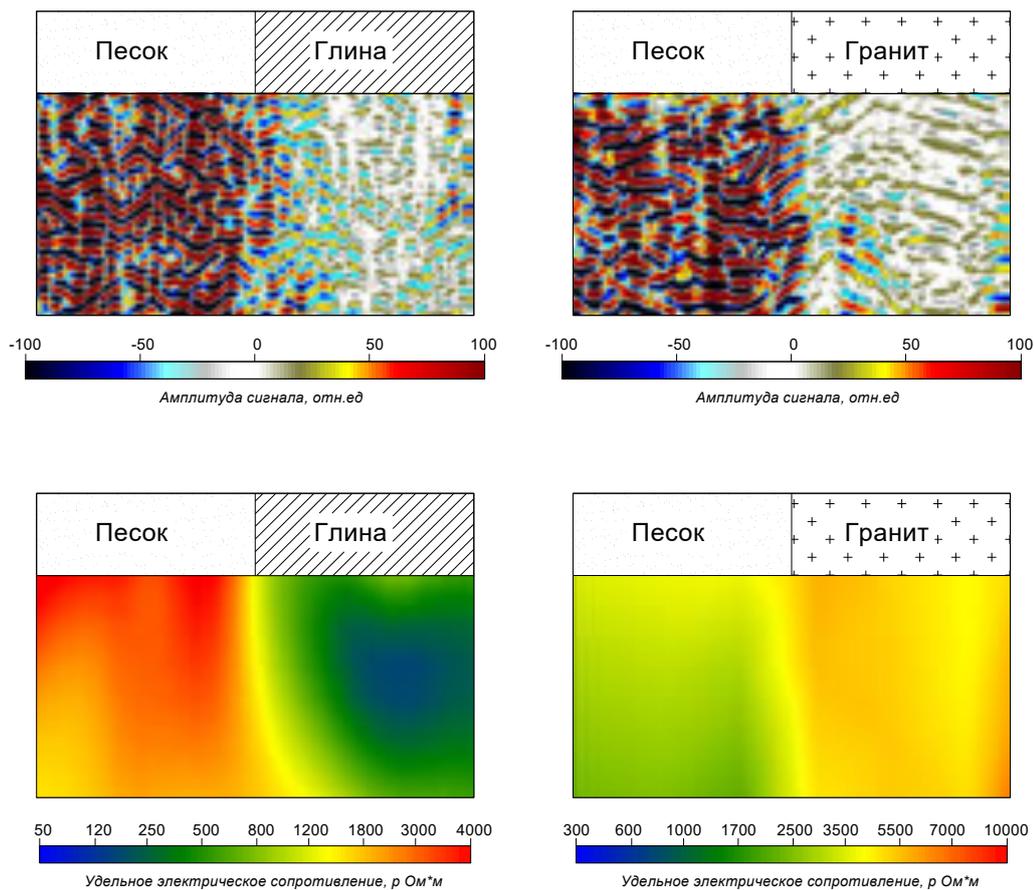


Рисунок 2.39 – Сопоставление волновой георадиолокационной картины глины и гранита и соответствующих им значений УЭС по данным электротомографии

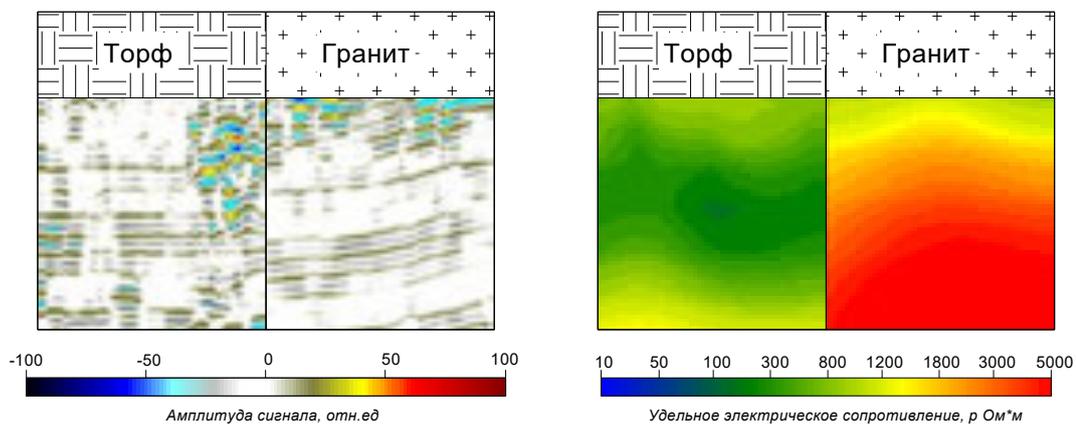


Рисунок 2.40 – Сопоставление волновой георадиолокационной картины торфа и гранита и соответствующих им значений УЭС по данным электротомографии

По определению Б.К. Матвеева (Матвеев Б.К., 1982; Модин И.Н., 2010) эквивалентность в понимании геофизика – это практическое равенство однотипных физических полей разным моделям строения геологического разреза. Основываясь на данном определении и приведенных

выше примерах, можно говорить об эквивалентности структуры волнового электромагнитного поля, например, для георадиолокационных моделей торфа и гранита.

Выводы к главе 2

Показано, что обоснованием комплексирования методов георадиолокации и электротомографии является пространственная корреляция геоэлектрических и георадиолокационных границ, которые отражают изменения электрофизических параметров геолого-геофизической модели реальной инженерно-геологической среды.

Снижение эквивалентности электротомографической модели достигается на основе использования фокусирующей по георадиолокационным границам инверсии. Снижение неоднозначности в интерпретации волновой георадиолокационной картины, в свою очередь, основывается на основе измерений электропроводности. Тем не менее, какими бы мощными ни были аппаратный комплекс сбора данных и математический аппарат их обработки, эквивалентность решения обратной задачи дает возможность только прогнозировать соответствие полученной геолого-геофизической модели реальному геологическому строению с определенной вероятностью. Основопологающим критерием оценки степени достоверности интерпретации геофизических данных является ее “геологичность”. Таким образом, при решении инженерно-геологических задач нужно учитывать, что переход к количественной интерпретации геофизических данных должен, в первую очередь, основываться на качественной интерпретации, в основе которой лежит согласованная геолого-геофизическая модель. Поэтому в концептуальной основе предложенного подхода к совместной обработке и интерпретации данных методов ГРЛ и ЭТ лежит отсутствие противоречий между георадиолокационными и электротомографическими границами.

Алгоритм получения согласованного ЭТ-ГРЛ разреза, лежащий в основе предлагаемого методического подхода к комплексированию методов ЭТ и ГРЛ, представлен на рисунке 2.41.

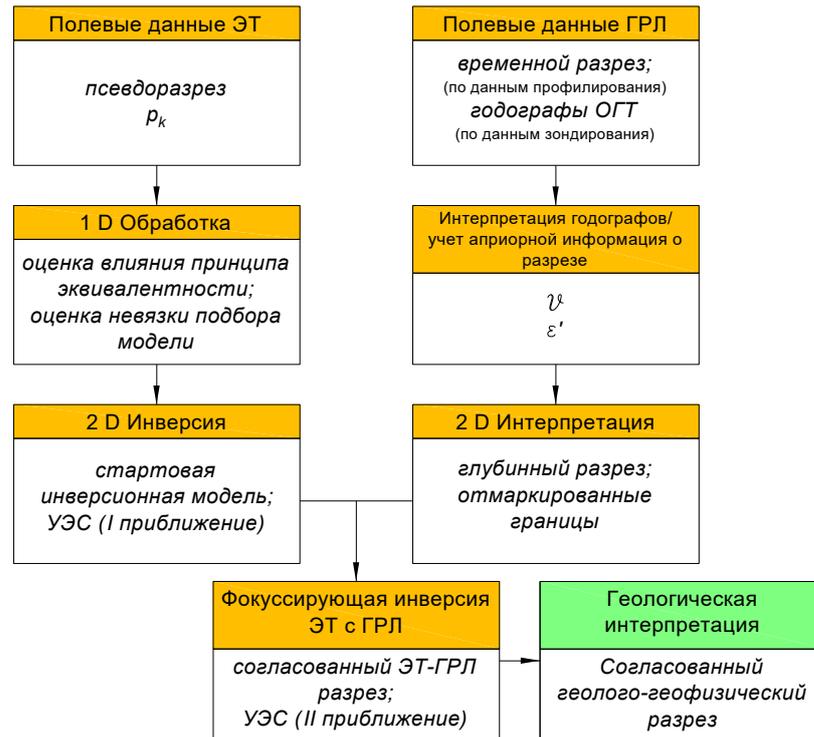


Рисунок 2.41 – Алгоритм получения согласованного ЭТ-ГРЛ разреза

На этой основе формулируется первое защищаемое положение: методический подход, основанный на комплексировании данных георадиолокации и электротомографии с целью построения согласованной георадиолокационно-электротомографической модели исследуемой среды, повышает достоверность геологической интерпретации результатов инженерно-геофизических исследований, обеспечивая сужение границ действия принципа эквивалентности при определении геометрических параметров и электрофизических свойств геологического разреза.

ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ РАЗРЕЗОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Оценка петрофизических параметров грунтов является актуальной задачей при проведении инженерно-геофизических исследований. Количественная петрофизика, основанная на уравнениях Сликтера и Козени-Кармана, широко применяется в основном в нефтегазовой геологии (Физика нефтяного и газового пласта, 1971). Возможность получения качественных и количественных оценок фильтрационных и физико-механических свойств грунтов методами инженерной геофизики обоснована теоретически и экспериментально (А.А. Огильви, А.А. Рыжов, В.А. Шевнин, К.В. Титов, М.Л. Владов, В.А. Явна, В.В. Капустин и др.). Между составом, строением и свойствами грунтов существуют взаимосвязи, как корреляционные, так и функциональные, как эмпирические, так и аналитические. Знание характера данных взаимосвязей дает возможность получать дополнительную информацию о неизвестных характеристиках грунтов на основе уже известных. Таким образом, успешное решение той или иной прикладной инженерной задачи будет напрямую зависеть от чувствительности измеряемого геофизического параметра к изменению интересующих петрофизических характеристик массива исследуемых грунтов.

Основным фактором, ограничивающим определения этих параметров на практике, является необходимость проведения большого объема лабораторных измерений для получения корреляционных зависимостей, связывающих геофизические и петрофизические параметры для конкретного участка исследований.

Чем больше геофизических характеристик будет вовлечено в описание петрофизической модели грунта, тем точнее эта модель будет отражать реальную геологическую среду. Перспективным направлением исследований является расчет петрофизических параметров на основе комплекса геофизических методов георадиолокации и электротомографии.

3.1 Петрофизическая модель песчано-глинистого грунта

Горные породы представляют собой сложные агрегаты минеральных частиц, связанных между собой силами молекулярного взаимодействия. В условиях естественного залегания они пронизаны системой пор и трещин, в той или иной степени заполненных водными растворами различного химического состава, концентрации и агрегатного состояния, а также воздухом (Зинченко В.С., 2005). На рисунке 3.1 схематически представлен фазовый состав горной породы.



Рисунок 3.1 – Фазовый состав горной породы (Зинченко В.С., 2005)

Для рыхлых грунтов удобно использовать двухкомпонентную модель песчано-глинистого грунта. Размеры зерен и пор песка и глины различаются примерно на 4 порядка. Мелкие частицы глины располагаются в порах песка до тех пор, пока объем глины меньше пористости песка; когда же объем глины больше, то уже части песка оказываются распределенными в глинистой матрице (рисунок 3.2). Капилляры песка и глины полностью (или частично) заполнены поровой влагой (Шевнин В.А., 2006).

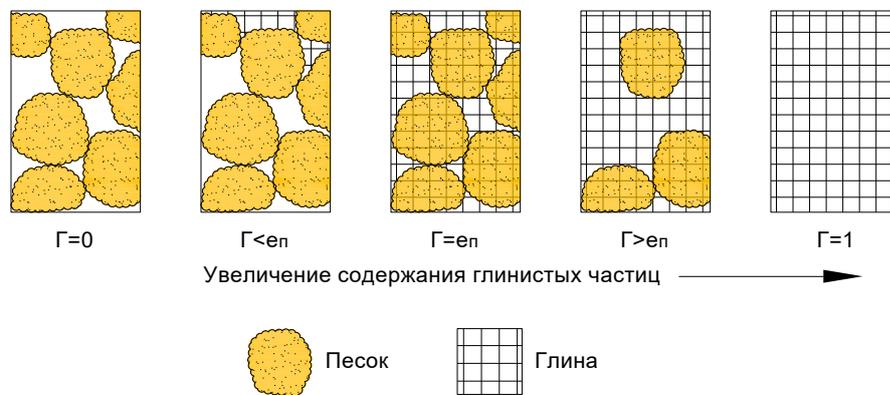


Рисунок 3.2 – Модель двухкомпонентной песчано-глинистой среды. Γ – содержание глинистой фракции, e – коэффициент пористости (Knoll and Knight, 1994)

Свойства грунтов многообразны по своей природе и классифицируются на физические, химические, физико-химические, физико-механические, биологические. Среди физических свойств выделяются плотностные, гидрофизические, газифизические, теплофизические, электрические, электрокинетические, электрохимические, магнитные и радиационные свойства (Грунтоведение..., 2005).

К электрическим свойствам относятся электропроводность и диэлектрическая проницаемость, являющиеся основными характеристиками, получаемыми на основе методов сопротивления и георадиолокации.

3.2 Оценка коэффициента фильтрации на основе электрофизических параметров

Достоинства методов инженерной геофизики связаны с возможностью получения экспресс оценки величин и характера изменений петрофизических параметров грунтов в естественном залегании. Особое значение при проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, и в особенности автомобильных дорог, имеет определение коэффициента фильтрации песков, слагающих искусственные насыпи и дренирующий слой основания дорожной одежды.

В дорожном строительстве к коэффициенту фильтрации строительных материалов, который характеризует их водопроницаемость, предъявляют особые требования, так как этот параметр прямо характеризует качество песка и возможности его применения для строительства насыпей (Методические рекомендации..., 1974; ОДМ 218.2.055-2015, 2015; Рекомендации по осушению..., 1970; Инструкция по проектированию..., 1985; ГОСТ 25607-2009. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные..., 2010). Низкое значение коэффициента фильтрации песка указывает на повышенное содержание глинистых примесей, что существенно ограничивает возможность эффективного использования такого материала для дорожного строительства.

Существующие способы определения коэффициента фильтрации опираются на применение хорошо отработанных лабораторных методов испытаний образцов, методика проведения которых регламентирована нормативными документами. Недостатки использования этих методов связаны, прежде всего, с трудоемкостью их проведения и необходимостью опробования грунтового массива с помощью скважин. Методика отбора образцов сопряжена с локальными разрушениями поверхностных покрытий, не позволяет выполнить непрерывное изучение пространственного распределения значений коэффициента фильтрации в грунтовом массиве и получить образцы песка в ненарушенном сложении.

С помощью методов инженерной геофизики появляется возможность существенно дополнить информацию, получаемую методами лабораторного анализа, которая, тем самым, минимизирует влияние перечисленных недостатков на результаты инженерно-геологических исследований. Применение комплекса методов инженерной электроразведки, включающего георадиолокацию и электротомографию, обеспечивает непрерывное изучение геологического разреза и получение качественных и количественных оценок фильтрационных свойств песков. Количественные оценки требуют привлечения ограниченной априорной геологической или

технической информации о строении и свойствах изучаемого геологического разреза или геотехнического сооружения.

3.2.1 Аналитическое выражение коэффициента фильтрации

Водопроницаемость грунтов – способность водонасыщенных грунтов пропускать сквозь себя воду за счёт градиента напора (Базовые понятия инженерной геологии..., 2012). Водопроницаемость характеризуется коэффициентом фильтрации, который равен линейной скорости фильтрации при единичном градиенте напора и обычно измеряется в м/сут.

Водопроницаемость грунтов зависит от множества факторов, что не позволяет в точной аналитической форме выразить зависимость коэффициента фильтрации от параметров того или иного грунта (Грунтоведение..., 2005). Между тем, аналитическую зависимость проницаемости от размера пор можно получить путем приложения законов Дарси и Пуазейля к пористой среде (Физика нефтяного и газового пласта, 1971):

$$K_p = \frac{\varphi r^2}{8}, \quad (3.1)$$

где K_p – проницаемость пористой среды; φ – пористость; r – радиус капилляра.

С учетом того, что проницаемость пористой среды и коэффициент фильтрации связаны следующим соотношением (Матвеев В.С., Рыжов А.А., 2006):

$$K_p = \frac{\mu}{g} \cdot K_f, \quad (3.2)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости; g – удельный вес жидкости, подставляя (3.2) в (3.1), получим аналитическое выражение для коэффициента фильтрации:

$$K_f = \frac{\varphi r^2 g}{8\mu}. \quad (3.3)$$

3.2.2 Связь коэффициента фильтрации с удельным электрическим сопротивлением

Формальная аналогия между геофильтрационным полем в пористой среде и полем постоянного электрического тока является предпосылкой для существования устойчивых связей между параметрами, определяющими проницаемость дисперсных пород, и их электропроводностью (Огильви А.А., 1990). Однако эта связь оказывается весьма сложной, так как зависит от совокупности факторов, к числу которых, в первую очередь, относятся размер и форма зерен, слагающих грунт, общая пористость, конфигурация порового пространства, минерализация воды, температура, состав цемента породы и многие другие факторы.

Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии, в условиях маломинерализованных вод, сравнительно стабильной корреляционной связи удельного электрического сопротивления (УЭС) и коэффициента фильтрации. УЭС песчано-глинистых пород на ограниченных участках обычно монотонно увеличивается с ростом K_f . Причем изменение минерализации подземных вод может коренным образом изменить характер этой связи, поэтому более обосновано использование вспомогательного параметра – относительного сопротивления, учитывающего УЭС поровой влаги (Дахнов В.Н., 1939; Archie G.E., 1942; Огильви А.А., 1990).

На основе экспериментально установленной зависимости для образцов песка с пористостью от 20 до 40% и минерализацией поровой влаги от 20 до 100 мг/л В.Н. Дахнов и G.E. Archie (Archie G.E., 1942) ввели понятие относительного сопротивления (или параметра пористости) F , связывающего УЭС водонасыщенного песка R_0 и УЭС поровой влаги R_w следующим соотношением:

$$R_0 = FR_w. \quad (3.4)$$

Многочисленные экспериментальные данные показали, что закон Дахнова-Арчи справедлив для пород, не содержащих заметного количества тонкодисперсной (глинистой) фракции (Keehm Y. et al, 2001; Revil A. et. al, 1998; Khalil M.A. et. al 2010). Последующие исследования и накопленный на большом количестве измерений опыт также показал, что параметр пористости F для чистых пород связан с пористостью φ (0.0-1.0) следующим соотношением (Archie G.E., 1942; Serra O., 1984):

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\varphi^m}, \quad (3.5)$$

где a – структурный коэффициент (0.6-2.0); m – показатель цементации (1.0-3.0).

Наиболее популярными с практической точки зрения являются формула, полученная на основе исследований нефтяной компании Humble Oil and Refining Co. (США):

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{0.62}{\varphi^{2.5}}, \quad (3.6)$$

и практически эквивалентная ей формула

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{0.81}{\varphi^2}, \quad (3.7)$$

описывающие структурные коэффициенты и показатели цементации для пород с относительно высокой пористостью (Winsauer W.O. et. all, 1952).

Объединив аналитическое уравнение (3.3) и эмпирическую зависимость (3.7), получим выражение коэффициента фильтрации через параметр относительного сопротивления:

$$K_f = \sqrt{\frac{0.81 \cdot R_w \cdot r^2 \cdot g}{R_0}} \cdot \frac{1}{8 \cdot \mu}. \quad (3.8)$$

Для практического использования формулы (3.8) нужно иметь в виду, что радиус капиллярных каналов песчаных коллекторов r может меняться в широких пределах со средними значениями от 0,5 до 0,0002 мм (Физика нефтяного и газового пласта, 1971). Для пресной воды при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ динамическая вязкость $\mu = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и удельный вес $g = 9810 \text{ Н/м}^3$. Кроме того, так как все вычисления выполняются в системе СИ, то для получения традиционных значений K_f в м/сут требуется умножить полученное по формуле (3.8) значение K_f на количество секунд в сутках.

3.2.3 Связь коэффициента фильтрации с содержанием глинистых частиц

В основе выражения (3.8) лежит закон Дахнова-Арчи, и оно будет справедливо только для чистых песков, что существенно ограничивает возможность его практического использования, т.к. общепризнанным фактом является то, что одним из основных факторов, влияющим на величину коэффициента фильтрации грунтов, является содержание глинистых частиц (Грунтоведение..., 2005; Огильви А.А., 1990; Shevnin V. et al, 2006).

У чистой глины коэффициент фильтрации стремится к нулю. Напротив, наибольший коэффициент фильтрации имеет крупнозернистый песок, между частицами которого хорошо проходит вода. В дисперсных грунтах, включая пески, примесь глинистых минералов приводит к снижению коэффициента фильтрации. Добавление к песку всего 10% глинистых частиц снижает водопроницаемость более чем на 50-60% (Грунтоведение..., 2005) (рисунок 3.3). Карьерный песок имеет значение коэффициента фильтрации от 0.5 до 7 м/сутки. Намывной песок имеет несколько другие значения: мелкая фракция (1-2 мм) – от 1 до 10 м/сутки, средняя фракция (2-2,5 мм) – от 5 до 20 м/сутки. Именно такой материал успешно применяется в производстве бетонов и строительных смесей, подсыпке дорог и фундаментов.

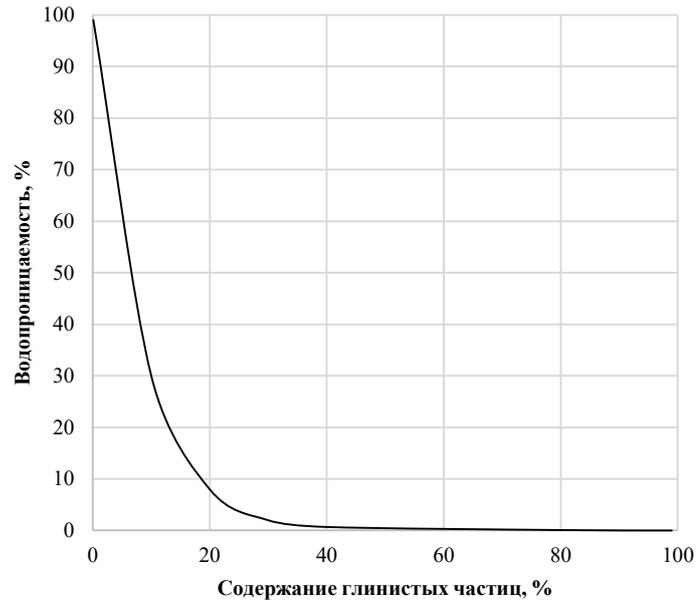


Рисунок 3.3 – Зависимость снижения водопрооницаемости песчаного грунта (%) от содержания в нем глинистых частиц (Грунтоведение..., 2005)

Существует ряд эмпирических аппроксимаций, связывающих между собой коэффициент фильтрации и содержание глинистых частиц. Наиболее известные среди них это аппроксимация А.А. Огильви (Огильви А.А., 1990):

$$K_f = C^{-2.5} \cdot 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}, \quad (3.9)$$

аппроксимация L. Slater и D. Lesmes (Slater L. and Lesmes D., 2002):

$$K_f = C^{-2.33} \cdot 4.39 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}, \quad (3.10)$$

и объединяющая их аппроксимация В.А. Шевнина (Shevnin V. et al, 2006):

$$K_f = C^{-2} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}. \quad (3.11)$$

Графическое представление данных аппроксимаций приведено на рисунке 3.4.

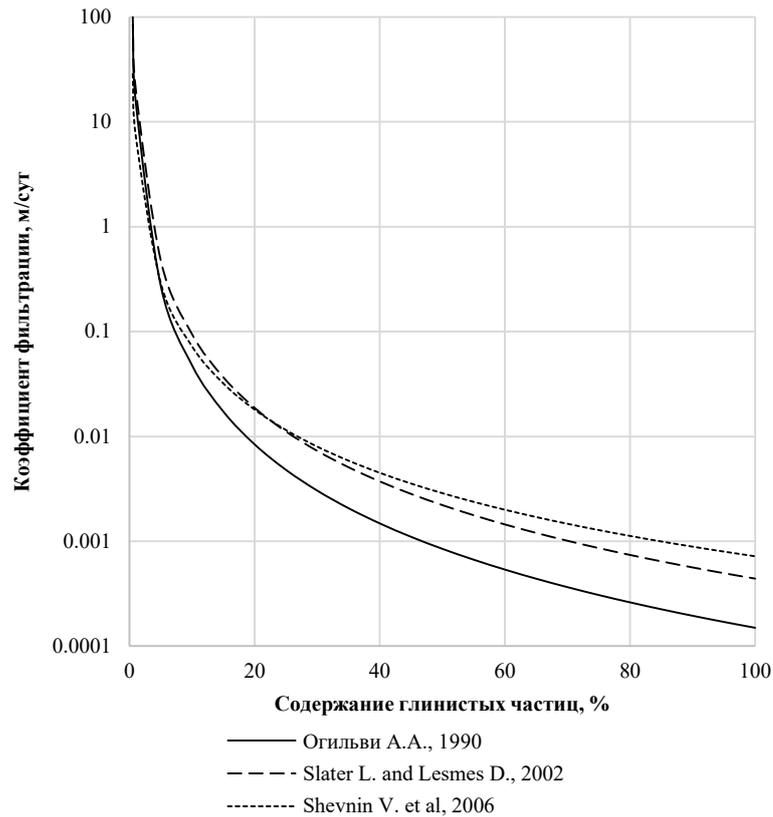


Рисунок 3.4 – Аппроксимации эмпирических связей между коэффициентом фильтрации и содержанием глинистых частиц по данным различных авторов

На графиках наблюдается общая устойчивая связь между коэффициентом фильтрации и содержанием глинистых частиц. Тем не менее, между аппроксимирующими кривыми также наблюдаются и существенные расхождения.

В первую очередь данные расхождения связаны с тем, что на коэффициент фильтрации, помимо содержания глинистых частиц, существенное влияние оказывает коэффициент неоднородности, что видно из графиков, приведенных на рисунке 3.5.

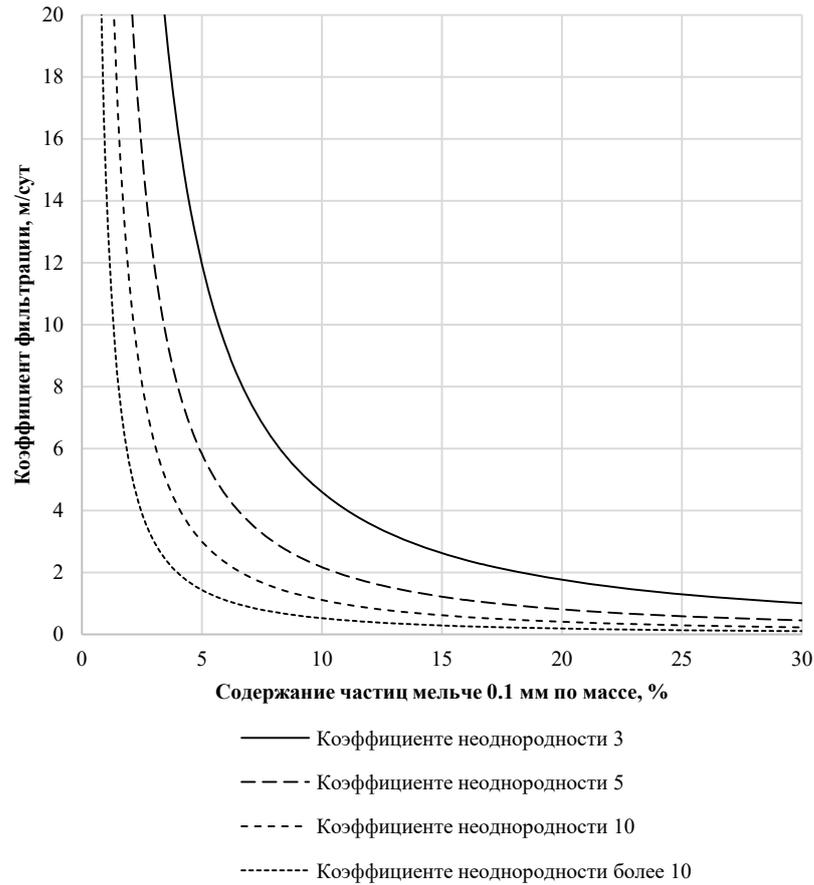


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента фильтрации воды от содержания в песке частиц мельче 0,1 мм и коэффициента его неоднородности (Пособие по проектированию ..., 1989)

Несмотря на ряд ограничений для практического использования, обобщающей методикой определения коэффициента фильтрации на сегодняшний день является подход, описанный в работах А.А. Рыжова и В.А. Шевнина (Шевнин В.А. и др. 2004; Shevnin V. et al, 2006), основанный на измерениях УЭС грунта и минерализации грунтовых вод.

3.2.4 Связь коэффициента фильтрации с параметром добротности Q

В качестве альтернативы существующей на сегодняшний день методике определения коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов рассмотрим подход, который основан на определении параметра добротности Q песчано-глинистых грунтов.

Корреляционные зависимости между глинистостью и соотношением действительной ε' и мнимой ε'' частями диэлектрической проницаемости (Wunderlich T., Rabbel W., 2013):

$$C = \frac{0.15 \sqrt{\varepsilon'' + 0.23}}{0.19 \varepsilon'}, \quad (3.12)$$

а также между глинистостью, добротность и влажностью θ :

$$C = \frac{0.16}{\sqrt{Q \cdot \theta^{0.1}}} \sqrt{\frac{28.2}{Q \cdot \theta^{0.1}}}, \quad (3.13)$$

позволяют с учетом (3.11) получить зависимость, связывающую отношение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости с коэффициентом фильтрации:

$$K_f = \frac{1}{0.15 \sqrt{\left(\frac{\epsilon'' + 0.23}{0.19 \epsilon'}\right)^2}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}. \quad (3.14)$$

Выражение коэффициента фильтрации через параметр добротности и влажности с учетом выражений (11) и (13) будет записываться следующим образом:

$$K_f = \frac{1}{0.16 \sqrt{\left(\frac{28.2}{Q \cdot \theta^{0.1}}\right)^2}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}. \quad (3.15)$$

Зависимости (3.14) и (3.15), полученные в работе (Wunderlich T., Rabbel W., 2013) и переработанные с учетом соотношения (3.11) для образцов с различными коэффициентами фильтрации, приведены на рисунке 3.6.

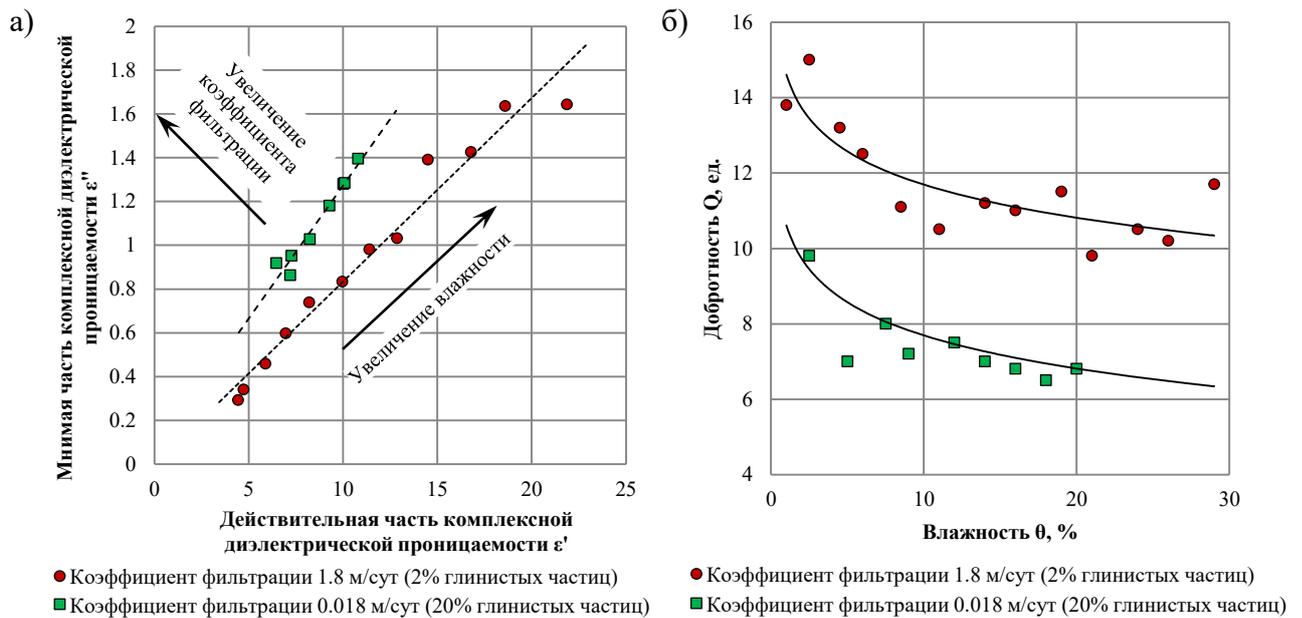


Рисунок 3.6 – Соотношение мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') частей диэлектрической проницаемости в зависимости от коэффициента фильтрации (а); добротность в зависимости от влажности для образцов с различным коэффициентом фильтрации (б)

Из рисунка 3.6 а видно, что соотношение мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') частей комплексной диэлектрической проницаемости будет зависеть как от изменения влажности, так и

от изменения коэффициента фильтрации, который, в свою очередь, контролируется процентным содержанием глинистых частиц. Причем изменение влажности отражается в большей степени на действительной (ε') части комплексной диэлектрической проницаемости, а изменение коэффициента фильтрации на ее мнимой части (ε''). Из рисунка 3.6 б следует, что при одинаковой влажности образцов большей добротностью Q будет обладать песок, коэффициент фильтрации которого будет больше.

Связь параметра добротности, электропроводности и действительной и мнимой частями диэлектрической проницаемости описывается уравнением (1.55) (Wunderlich T, Rabbel W, 2013; Vano M., 2004; Scheers B., 2001), рассмотренным в первой главе.

Учитывая, что угловая частота $\omega = 2\pi f$, удельное электрическое сопротивление $\rho = \frac{1}{\sigma_{DC}}$ и диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 \approx 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ из (1.55), получим

$$\varepsilon'' \approx \frac{\varepsilon'}{Q} - \frac{1}{\rho \cdot f \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_0}. \quad (3.16)$$

Тогда, подставив (3.16) в (3.14), получим формулу, пригодную для практических расчётов:

$$K_f \cong \frac{1}{\sqrt[0.15]{\left(\frac{\rho f 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon' - Q + 0.23 Q \rho f 2\pi \varepsilon_0}{Q \rho f 2\pi \varepsilon_0 0.19 \varepsilon'}\right)^2}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}. \quad (3.17)$$

Преимуществом выражения (3.17) является его комплексность, характеризующаяся зависимостью коэффициента фильтрации от целого ряда измеряемых электрофизических параметров. Значения ε' , f определяются на основе метода георадиолокации, значения ρ определяются на основе метода сопротивлений. Для песка с заданными свойствами зависимость параметра добротности от коэффициента фильтрации и содержания глинистых частиц проиллюстрирована на рисунке 3.7.

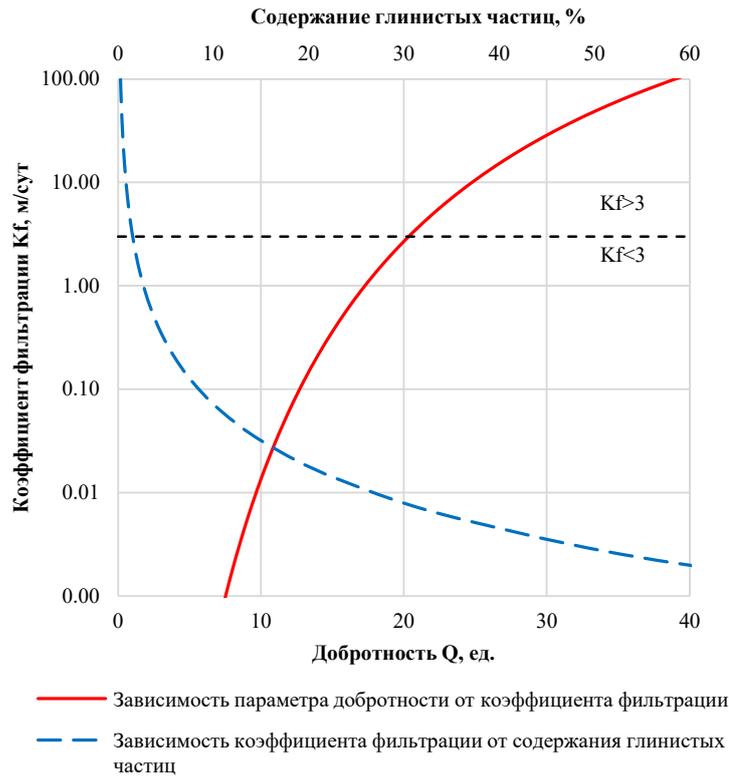


Рисунок 3.7 – Зависимость параметра добротности Q от коэффициента фильтрации; зависимость коэффициента фильтрации от и содержания глинистых частиц (на частоте $f = 1000$ МГц для песка со значениями $\varepsilon' = 4$; $\rho = 900$ Ом·м)

Граница перехода через значение коэффициента фильтрации 3 м/сутки, между водопроницаемым и сильноводопроницаемым грунтом (ГОСТ 25100-2011, 2013), характеризуется устойчивым ростом параметра добротности от 15 до 25 единиц и его высокой чувствительностью к изменению коэффициента фильтрации в диапазоне от 1 до 10 м/сутки.

Сравним зависимости параметра добротности и УЭС от коэффициента фильтрации для песка с заданными параметрами УЭС и добротности, полученным по формулам (3.8) и (3.17). Данные зависимости приведены на рисунке 3.8.

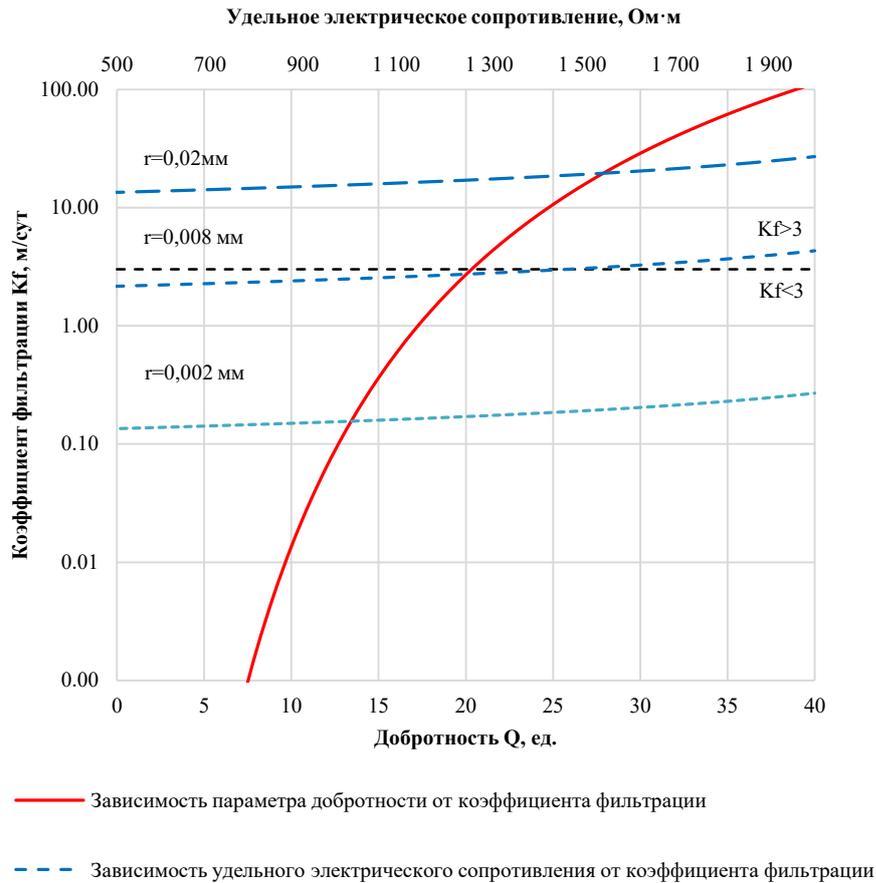


Рисунок 3.8 – Сравнение зависимостей параметра добротности Q от коэффициента фильтрации (на частоте $f = 1000$ МГц для песка со значениями $\varepsilon' = 4$; $\rho = 900$ Ом·м) и удельного электрического сопротивления от коэффициента фильтрации для грунтов с различными радиусами капиллярных каналов ($r=0,02$; $r=0,008$; $r=0,002$)

Для частного случая, когда известен радиус капиллярных каналов грунта, график изменения УЭС гораздо чувствительнее к изменению коэффициента фильтрации в отличие от параметра добротности. Между тем, радиус капиллярных каналов в полевых условиях определить не представляется возможным, поэтому определение коэффициента фильтрации через параметр добротности на основании формулы (3.17) представляет большой практический интерес.

3.2.5 Выводы по разделу

Таким образом, одним из перспективных направлений исследований в данной области на сегодняшний день является количественная оценка глинистости грунтов в рамках изучения песчано-глинистого геологического разреза и расчет коэффициента фильтрации на основе комплекса методов сопротивления и георадиолокации с использованием параметра добротности

Q, связывающего различные электрофизические параметры исследуемой среды (Wunderlich T., Rabbel W., 2013; Glazounov V.V, Lalomov D.A., 2014). Между тем, переход к количественному анализу георадиолокационных данных требует четкого представления о влиянии на измеряемые и рассчитанные на их основе электрофизические параметры не только литологических особенностей исследуемых грунтов, но и такого внешнего фактора, как общая минерализация грунтовых вод.

3.3 Определение влияния минерализации на параметр добротности

В разделе приводятся результаты исследований, целью которых являлось установление зависимости между электропроводностью, минерализацией и параметром добротности, получаемым на основе георадиолокационных данных (Лаломов Д.А., Глазунов В.В., 2017). Суть исследований заключается в определении перспективы количественной оценки геофизических данных на основе комплексирования электроразведочных методов сопротивления и георадиолокации. В практической части раздела описывается методика формирования двуслойной лабораторной баковой георадиолокационной модели и способы измерения ее электрофизических параметров как традиционными геофизическими методами со стандартным оборудованием, так и с помощью вспомогательных измерительных устройств. Теоретическая часть раздела посвящена реализации различных подходов к вычислению добротности среды на основе лабораторных георадиолокационных измерений. Экспериментально полученные данные, подтвержденные аналитическими расчетами, указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации. Важным выводом является то, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность. Опытным путем установлено, что скорость распространения георадиолокационного сигнала не зависит от электропроводности среды.

3.3.1 Минерализация в методах геоэлектрики

Под минерализацией воды или сухим остатком в гидрогеологии понимается сумма всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ (Климентов П.П., Богданов Г.Я., 1977). Состав сухого остатка не совпадает полностью с составом веществ, присутствующих в растворе: газы улетучиваются, бикарбонаты переходят в карбонаты, сульфат кальция может осаждаться в виде гипса, поглощающего часть воды, а небольшие количества магния, хлоридов и нитратов могут улетучиться. Тем не менее, по сухому остатку, как и по электропроводности, можно приблизительно оценить точность полученной суммы растворенных твердых веществ. В свою очередь, удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород определяется в

значительной мере минерализацией подземных вод, так как электропроводность у пород в основном ионная (Хмелевской В.К., 1999). Опыт также показывает, что основным фактором, определяющим величину УЭС пород, является удельное сопротивление поровой влаги (Матвеев В.С., Рыжов А.А., 2006).

Сопротивление песчано-глинистой смеси зависит от размеров зерен и капилляров каждого компонента и их пористости, от солености поровой влаги, процентного соотношения глины и песка, температуры, влажности грунта, ионно-обменной емкости глины (Шевнин В.А. и др., 2006). Песок и глина, являющиеся крайними компонентами песчано-глинистого ряда, в условиях различной минерализации грунтовых вод на участке могут иметь схожие значения УЭС. Таким образом, при изучении песчано-глинистых разрезов методом сопротивления учет минерализации грунтов имеет большое значение для корректной интерпретации полученных данных. Петрофизическая связь между минерализацией и удельным электрическим сопротивлением грунта в рамках метода сопротивления изучена хорошо и подробно описывается в работах В.А. Шевнина, А.А. Рыжова и В.С. Матвеева (Шевнин В.А. и др., 2006; Матвеев В.С., Рыжов А.А., 2006; Матвеев В.С. и др. 1985).

Влияние минерализации воды, насыщающей песчаные грунты, на данные метода георадиолокации, в отличие от метода сопротивления, изучено недостаточно. Известен опыт применения метода георадиолокации Санкт-Петербургским государственным горным институтом для поиска и разведки месторождений песка (Глазунов В.В. и др., 2000). Метод был апробирован на нескольких месторождениях песка в Ленинградской области. В пресных водоемах и песках глубинность изучения разреза достигала десятков метров, а на акваториях с повышенной минерализацией воды и в разрезах, содержащих слои глины, глубинность резко сокращалась. Исследования, выполненные на образцах грунта, показали, что с увеличением минерализации воды увеличивается и коэффициент отражения георадиолокационного сигнала от верхней границы образца (Hagrey S.A., Muller C., 2000). Причем наиболее отчетливо данный эффект наблюдается при сопоставлении амплитуд частотных спектров отраженных сигналов. В работе (Kiselev E.Yu., 2009) приводится пример определения электропроводности среды при помощи амплитудного анализа радарных данных на границе галоклина. В данной работе примечательно то, что георадиолокационные отражения наблюдались от границы перехода между пресной и соленой водой. В работе (Садовский И.Н. и др., 2013) отмечаются существенные расхождения модельных и экспериментальных оценок величины комплексной диэлектрической проницаемости в области высоких значений температуры и солёности электролита, которые наглядно демонстрируют острую нехватку данных систематических

лабораторных измерений величины комплексной диэлектрической проницаемости водной среды с повышенным содержанием солей.

3.3.2 Параметр добротности Q среды в методе георадиолокации

Параметр добротности Q среды, характеризующий распространение упругих колебаний в диссипативных средах, хорошо известен в сейсморазведке (Боганик Г.Н., Гурвич И.И., 2006). Он является атрибутом Гильберт-преобразования сейсмической записи и, среди прочего, нашел свою практическую ценность при литологической интерпретации сейсмических данных еще в начале 80-х годов 20 века (Ампиров Ю.П., 2008). В георадиолокации параметр добротности Q также иногда находит свое применение в графе обработки георадиолокационных данных в рамках атрибутивного анализа (Tronicke J., Böniger U., 2013), хотя связь этого параметра с литологической характеристикой различных грунтов на сегодняшний день не изучена достаточно. С физической точки зрения параметр Q определяет отношение запасенной энергии системы к потерям энергии за один период колебаний электромагнитной волны (Liu L. et. al., 1998). В георадиолокации параметр Q используется для характеристики диэлектрических потерь или затухания и рассеяния электромагнитных волн (Bano M., 1996), и может рассматриваться как дополнительный независимый электрофизический параметр для характеристики свойств грунта. Известно, что основной причиной затухания электромагнитной волны в грунте является увеличение содержания глинистой фракции (Ефимова Н.Н., 1999), и, как отмечалось выше, схожим образом на затухание георадиолокационного сигнала влияет повышение минерализации грунта (Глазунов и др. 2000). В лабораторных условиях для различных песчано-глинистых грунтов были получены эмпирические зависимости между их глинистостью, влажностью и параметром добротности (Wunderlich T., Rabbel W., 2013). Вопрос о зависимости между минерализацией воды, насыщающей грунт, и параметром добротности на сегодняшний день разработан недостаточно.

Таким образом, цель данного исследования состояла в установлении степени влияния удельного электрического сопротивления и минерализации на параметр добротности Q среды, получаемый на основе георадиолокационных данных. В качестве объекта лабораторных исследований использовалась двухслойная баковая модель, состоящая из слоя воды, перекрывающего слой песка с переменной минерализацией в широком диапазоне, и подстилающей их алюминиевой пластины, являющейся абсолютным рефлектором электромагнитных импульсов георадара. После тщательного перемешивания воды с песком параметр добротности Q слоев модели определялся для различных значений минерализации воды. В качестве измерительного оборудования для определения минерализации и УЭС

использовались как стандартные комплекты геофизической аппаратуры, так и вспомогательные устройства.

Параметр добротности Q каждого из слоев модели независимо определялся двумя различными методами, реализованными как во временной, так и в частотной областях. Полученные результаты сравнивались с аналитической зависимостью, рассчитанной на основании известных формул (Wunderlich T., Rabbel W., 2013).

Экспериментально полученные данные указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации воды. Важно отметить, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность.

3.3.3 Создание баковой многослойной георадиолокационной модели

С учетом рекомендаций, описанных в работе (Судакова М.С., 2009), аналоговая георадиолокационная модель формировалась в стеклянном баке, на дне которого размещалась алюминиевая пластина, являющаяся абсолютным рефлектором электромагнитных импульсов георадара. Модель включала слой воды, перекрывающий слой песка. Антенная система георадара с частотой 1200 МГц располагалась на поверхности модели (рисунок 3.9).

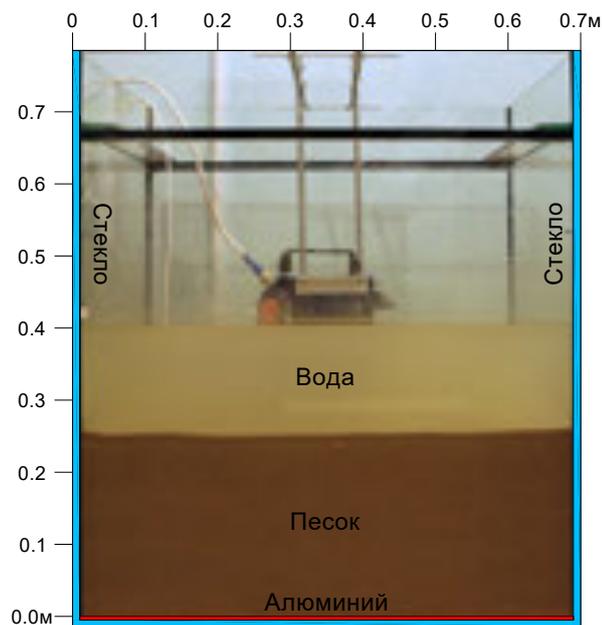


Рисунок 3.9 – Двухслойная физическая баковая модель

Спецификой сформированных слоистых моделей является их трехмерность, обусловленная пространственными ограничениями исследуемой среды стенками бака. При выборе оптимальных параметров наблюдений волнового поля использовались рекомендации, разработанные для моделирования однослойной модели среды в баке (Судакова М.С., 2009). Двухслойная модель является более сложной для георадиолокационных исследований. При

выборе оптимального соотношения мощности слоев этой модели и размеров бака необходимо учитывать дополнительные факторы, обеспечивающие надежную регистрацию целевых волн.

Для выделения отраженных волн, связанных с исследуемыми отражающими границами, на фоне возможных волн-помех при создании модели учитывалось влияние двух основных факторов, связанных с кратными волнами и отражениями от стенок бака.

Предварительный этап создания баковой модели двуслойной среды включал математическое моделирование среды с различными параметрами. Для вычислений использовалась программа, основанная на алгоритме вычисления распространения электромагнитных импульсов георадара, заданной центральной частоты, в 2D пространстве методом конечных разностей во временной области (Tzanis A., 2010).

Сопоставление синтетической и наблюдаемой георадарограмм бака, заполненного водой, позволяет сделать вывод о хорошей сходимости теоретических и экспериментальных данных (рисунок 3.10). На рисунке 3.10 четко прослеживаются боковые отражения от стенок бака, которые в нашем случае являются помехами, затрудняющими выделение полезного сигнала.

Анализ георадарограмм позволил выбрать оптимальную толщину слоя воды для регистрации отраженной от дна бака волны с минимальными искажениями.

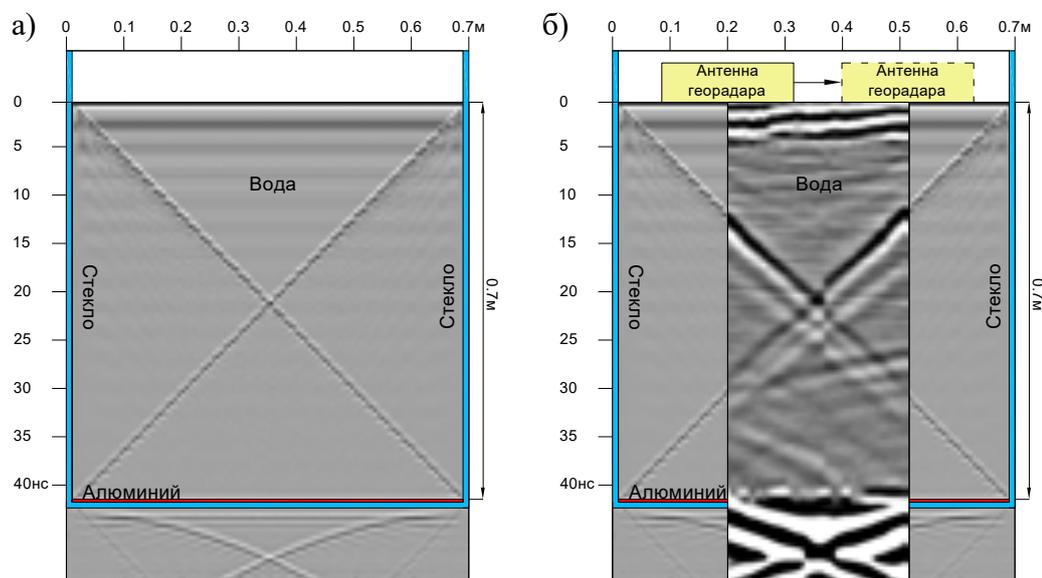


Рисунок 3.10 – Теоретическая (а) и экспериментальная (б) георадарограммы однослойного разреза баковой модели

На рисунке 3.11 приведена синтетическая и экспериментальная георадарограммы двуслойной среды, представленной слоями воды и песка. Выбор параметров аналоговой модели обеспечил надежную регистрацию полезных волн, отраженных от двух электрофизических

границ, на фоне волн-помех, связанных с кратными и отраженными от стенок бака волнами. В результате обработки наблюдаемых георадарограмм получены трассы георадиолокационных сигналов, на которых отраженные волны от основных рефлекторов выделены с максимальным значением отношения полезный сигнал/помеха.

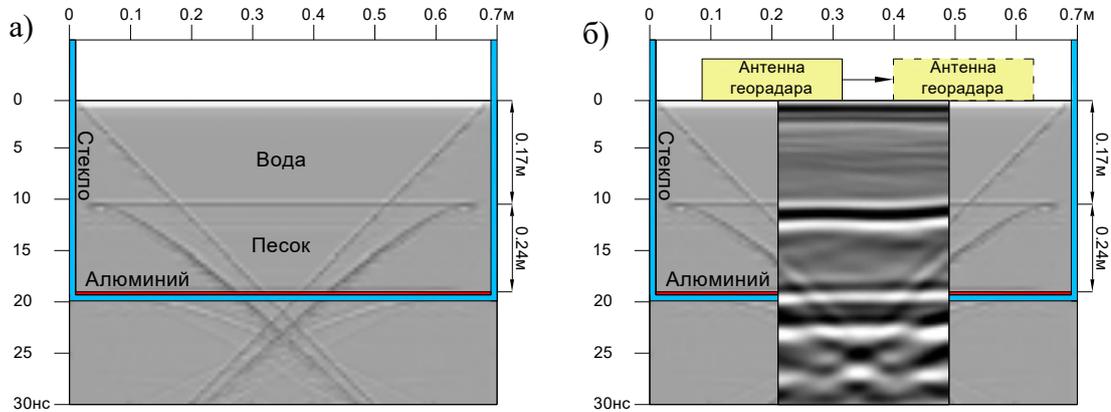


Рисунок 3.11 – Теоретическая (а) и экспериментальная (б) георадарограммы двуслойного разреза баковой модели

3.3.4 Описание эксперимента

Эксперимент состоял из пошагового увеличения минерализации воды в баке с последующей регистрацией отраженного георадиолокационного сигнала для заданных значений минерализации. Минерализация воды повышалась за счет добавления в нее хлорида натрия. Повышение минерализации слоя песка достигалось тщательным перемешиванием песка с водой и отстаиванием модели в течение суток. Формируемые модели характеризовались определенными значениями минерализации воды и, соответственно, удельными сопротивлениями воды и песка (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Изменение параметров модели

№ Опыта	Минерализация воды, г/л	УЭС воды, Ом·м	УЭС песка, Ом·м	Температура, °С
1	0.03	152	356	16.7
2	0.07	67	179	16.6
3	0.19	26	73	16.7
4	0.41	12	37	17.0
5	0.66	8	23	16.6
6	2.00	3	8	16.4

Несмотря на использование дистиллированной воды, нижний предел минерализации воды после первого перемешивания модели составил 0.03 г/л, что было обусловлено изначальным присутствием незначительной концентрации соли в кварцевом песке. Верхний предел минерализации воды составил 2г/л. Увеличение минерализации выше этого предела характеризовалось полным затуханием электромагнитной волны уже в верхнем слое воды.

В процессе эксперимента проявилось образование взвеси в слое воды после ее перемешивания со слоем песка. Выпадение осадка произошло при переходе минерализации 0.2 г/л (рисунок 3.12).

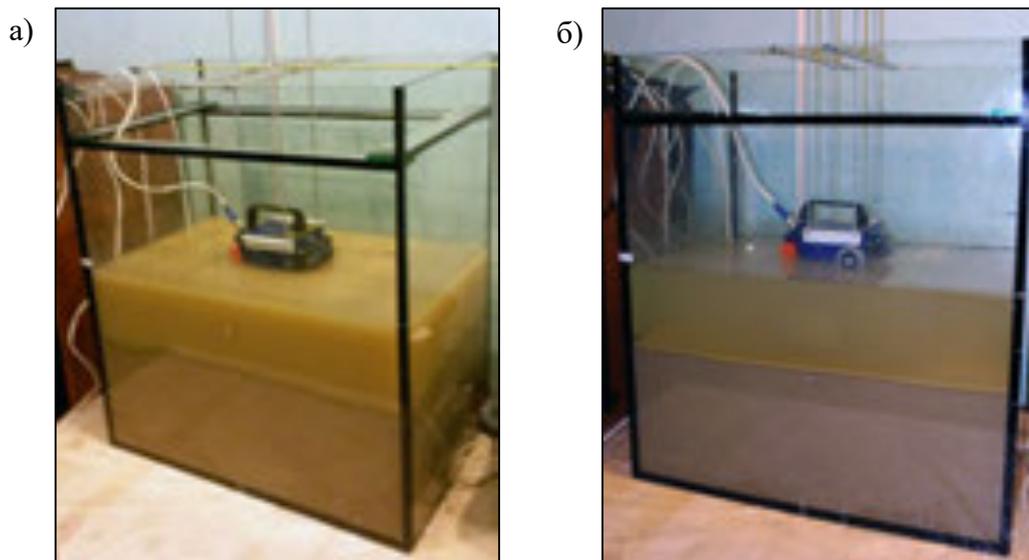


Рисунок 3.12 – (а) взвесь в слое воды (минерализация воды до 0.2 г/л); (б) выпадение осадка (минерализация воды более 0.2 г/л)

Образовавшаяся в слое воды взвесь представлена глинистыми частицами с примесью растворенной гумусовой органики, что вполне характерно для используемого в опыте кварцевого песка с карьера месторождения “Муравеня” Милославского района Рязанской области (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Кварцевый песок с карьера “Муравеня”

После достижения определенной солености воды срабатывает геохимический барьер, запускающий механизм флокуляции (Фридрихсберг Д.А., 1995), в процессе которого происходит превращение золя в гель и хлопьевидное осаждение. Природным аналогом такого процесса является осаждение мути в дельте рек, впадающих в море. Поверхностный заряд на частицах взвеси препятствует их слипанию и осаждению, при появлении ионов соли заряд компенсируется, частицы слипаются, увеличиваются и выпадают. Пороговое значение солености, после которого процесс начинает существенно ускоряться, разный для разных по составу и концентрации взвесей. В данном эксперименте он составил 0,2 г/л.

Несмотря на побочные эффекты, возникающие при формировании баковой модели, полученная зависимость удельного электрического сопротивления слоев от минерализации воды (рисунок 3.14) соответствует известной зависимости (Электроразведка..., 1994).

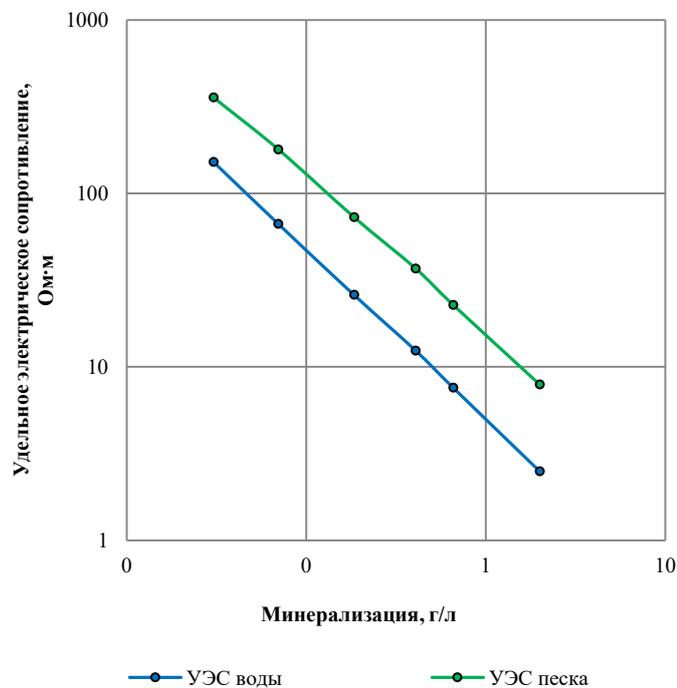


Рисунок 3.14 – Изменение УЭС слоев баковой модели с ростом минерализации

По полученным зависимостям можно определить эмпирические формулы перехода от минерализации воды к удельному электрическому сопротивлению слоев, которые будут иметь вид для воды $\rho_{\text{воды}} = \frac{4.8}{M}$ и для песка $\rho_{\text{песка}} = \frac{13.0}{M}$, где M – значение минерализации. Следует отметить, что данные формулы верны только для солености ниже 5 г/л и конкретных рассматриваемых условий, когда в качестве соли выступает NaCl, а средняя температура среды составляет 16,7 °С.

Измерения электропроводности воды выполнены с использованием портативного кондуктометра (рисунок 3.15 а). Измерения электропроводности песка осуществлены с использованием грунтового четырех электродного резистивиметра закрытого типа (Shevniin et. al. 2005) (рисунок 3.15 б).

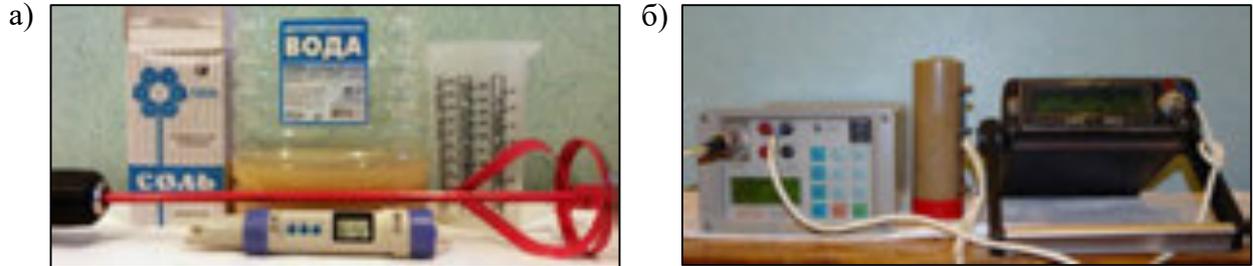


Рисунок 3.15 – (а) портативный кондуктометр; (б) резистивиметр закрытого типа

Пример георадиолокационной записи одного из опытов, где четко видны основные рефлекторы, к которым относятся границы вода-песок и песок-алюминий, представлен на рисунке 3.16.

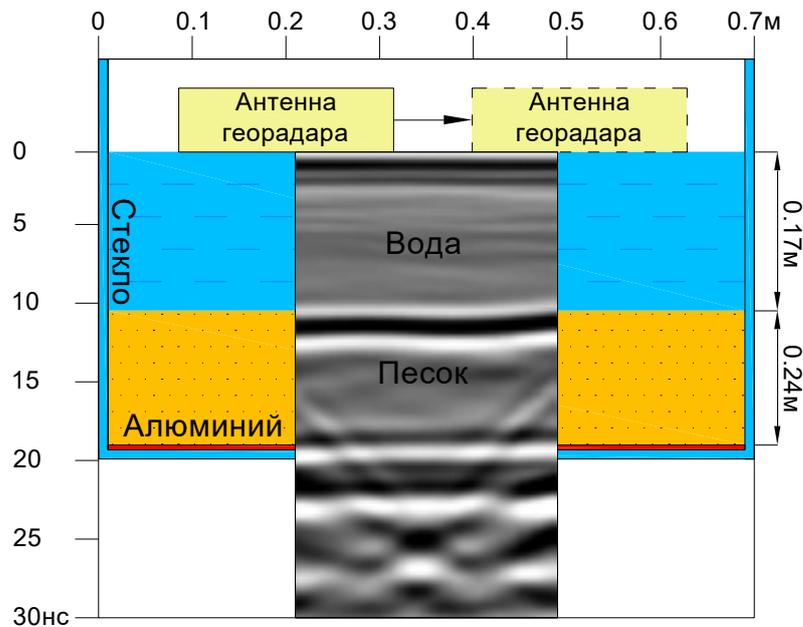


Рисунок 3.16 – Пример георадиолокационной записи одного из опытов

На рисунке 3.17 представлена совокупность всех полученных в процессе эксперимента георадиолокационных записей в виде объединенных радарограмм, на которых проявилось изменение интенсивности отраженных сигналов, обусловленное повышениями минерализации воды.

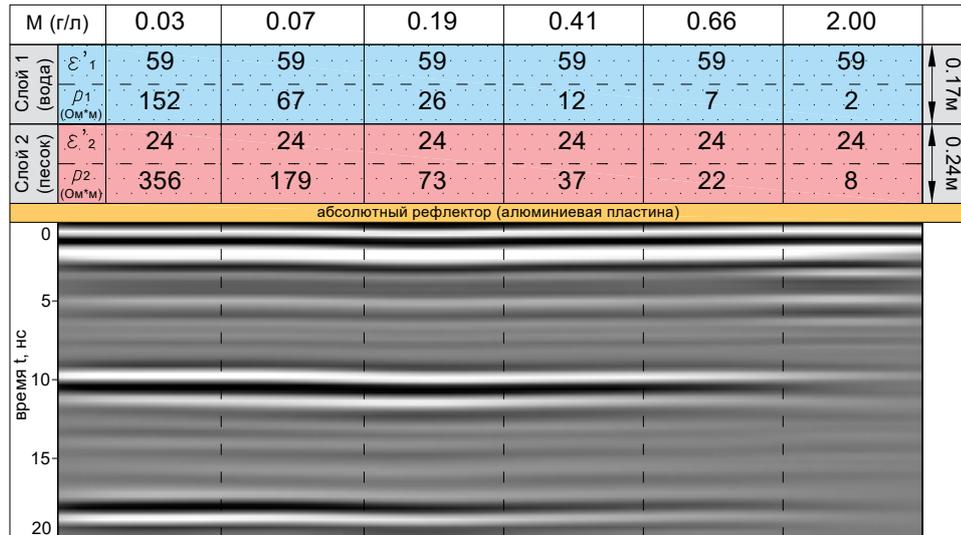


Рисунок 3.17 – Изменение интенсивности отраженного сигнала в процессе изменения электрофизических параметров георадиолокационной модели

Значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ε' определялись из известного соотношения:

$$\varepsilon' = \left(\frac{c \cdot t}{2h} \right)^2, \quad (3.18)$$

где c - скорость света в вакууме, t - время пробега волны до отражающей границы и обратно, h - мощность слоя.

Заметим, что диэлектрическая проницаемость, полученная для верхнего слоя модели, составила 59 единиц, а не 81, как указывается во многих литературных источниках для чистой воды. Эта значительная разница объясняется тем, что в верхнем слое воды образовалась взвесь глинистых частиц, о которой уже упоминалось выше.

Кроме того, важным фактом, наблюдаемым в процессе эксперимента, явилось то, что скорость распространения георадиолокационного сигнала не зависит от электропроводности среды.

Для определения Q набор трасс, полученных в каждом из экспериментов, усреднялся и преобразовывался методом Гильберта. Результаты преобразований в виде огибающих отраженных сигналов, нормированных по амплитуде прямой волны, приведены на рисунке 3.18.

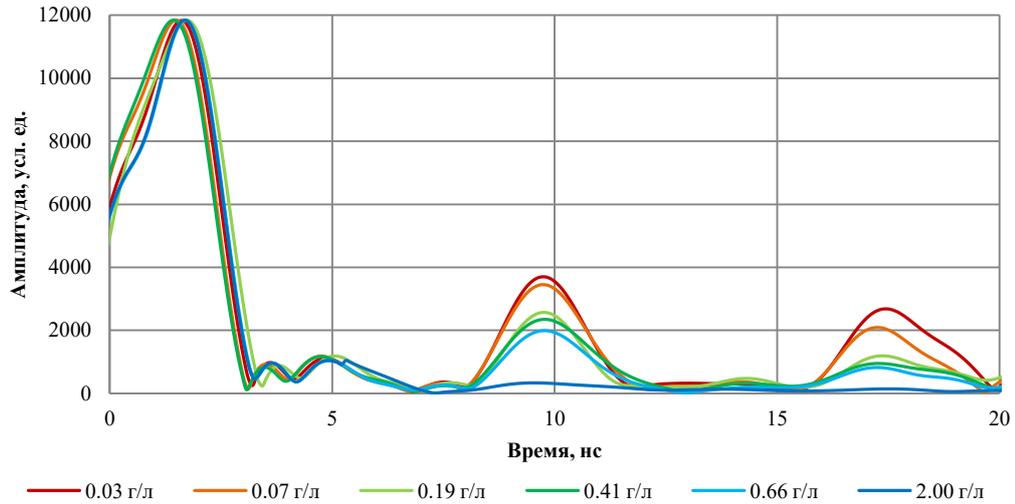


Рисунок 3.18 – Огибающие отраженных сигналов, нормированные по амплитуде прямой волны

3.3.5 Определение параметра добротности Q

Аналитическая зависимость, связывающая электропроводность, действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости среды, рассмотрена в первой главе и согласно (Wunderlich T., Rabbel W., 2013) описывается уравнением (1.55).

Произвести прямые измерения мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' в условиях описываемого эксперимента не представлялось возможности, поэтому для аналитических расчетов использовались значения ε'' , приведенные в литературных источниках для воды и песка, которые использовались в модели (для воды $\varepsilon'' = 4.86$ (Meissner T., Wentz F.J., 2004) и для песка $\varepsilon'' = 1.01$ (Ефимова Н.Н., 1999)).

На основе выражения (1.55) и экспериментальных данных получены аналитические зависимости добротности от минерализации для слоев рассматриваемой модели (рисунок 3.20). Зависимости хорошо аппроксимируются экспоненциальными уравнениями вида $y = ke^{-\alpha x}$ с различными для каждого из слоев коэффициентами пропорциональности k и α , зависящими от свойств среды и коэффициентом детерминации $R^2 > 0.98$.

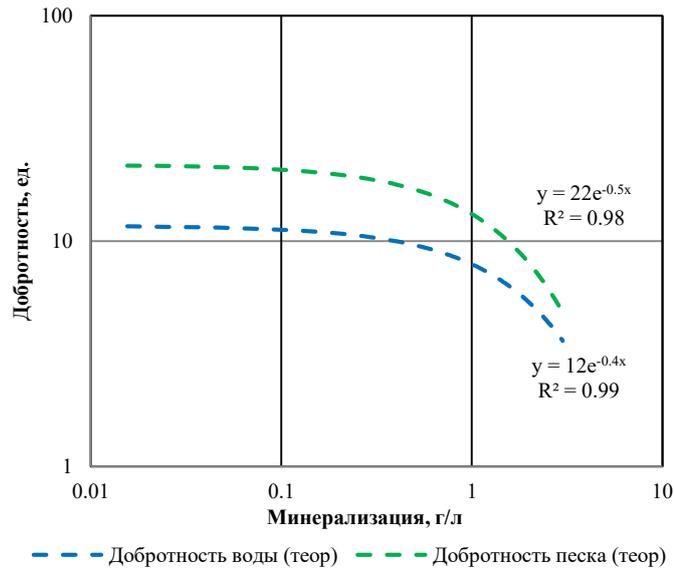


Рисунок 3.20 – Теоретические зависимости добротности от минерализации для воды и песка

Для определения параметра добротности Q слоев модели на основе экспериментальных данных использовались существующие в сейсмометрии метод амплитудного спада и метод спектральных отношений (Тонн Р., 1991).

Одним из самых простых и широко используемых методов определения параметра добротности Q является метод амплитудного спада, реализуемый во временной области (Тонн Р., 1991). Параметр добротности рассчитывается из отношения амплитуд сигналов записанных до и после прохождения волны через поглощающую среду

$$Q = \frac{\omega \Delta x}{2V} \left\{ \ln \left[\frac{A(x_0)}{A(x_1)} \right] \right\}^{-1}, \quad (3.19)$$

где V – скорость волны, Δx – мощность слоя, $\omega = 2\pi f$ – центральная частота сигнала, $A(x_0)$ и $A(x_1)$ – амплитуды исходного и отраженного сигнала соответственно. В случае метода георадиолокации в качестве исходной амплитуды $A(x_0)$ обычно используют амплитуду прямой волны, распространяющейся в воздухе. Скорость прохождения волны определяется из известного соотношения (1.33), рассмотренного в первой главе.

Амплитуды сигналов, отраженных от подошв первого и второго слоев, использованные в расчетах, приведены на рисунке 3.21. Исходный сигнал характеризовался амплитудой прямой волны $A(x_0) = 11826$ на нулевом расстоянии от антенны x_0 (рисунок 3.18) и частотой $f = 1200$ МГц.

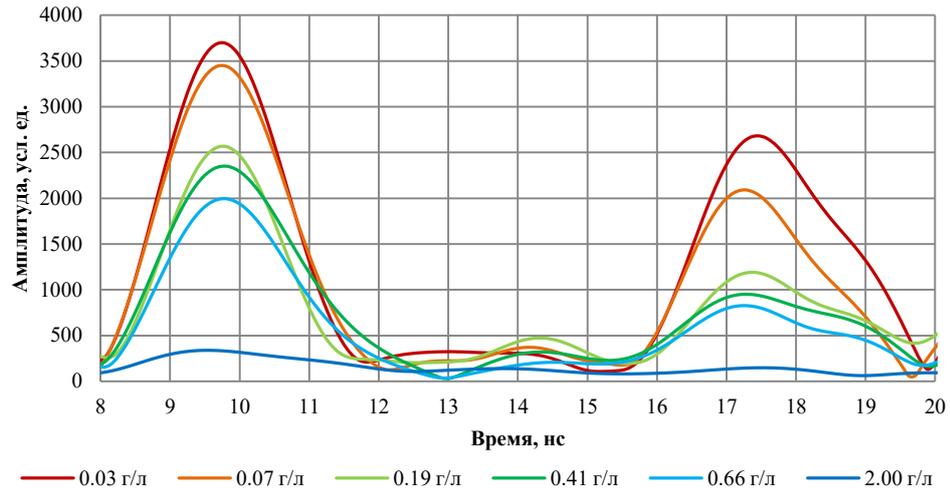


Рисунок 3.21 – Отраженные сигналы от границ вода-песок (15 нс) и песок-алюминий (23 нс) после преобразования Гильберта

Общая добротность модели и добротность первого слоя рассчитывались по формуле (3.19). Добротность второго слоя рассчитывалась с использованием пропорционального выражения

$$\bar{Q} \cdot \bar{h} = Q_1 \cdot h_1 + Q_2 \cdot h_2, \quad (3.20)$$

где \bar{Q} – эффективная (общая) добротность модели мощностью $\bar{h} = h_1 + h_2$, Q_1, Q_2 – добротности первого и второго слоев а h_1, h_2 их мощности.

Для контроля определения параметра Q_2 слоя песка двуслойной модели добротность песка дополнительно определялась на однослойной модели водонасыщенного песка при минимальной и максимальной минерализации воды. На рисунке 3.22 приведены трассы и их огибающие (преобразование Гильберта) для слоя песка, полученные в рамках однослойной модели в конце и в начале эксперимента (при минимальной и максимальной минерализации воды), когда верхний слой воды перекрывающий песок сливался из бака.

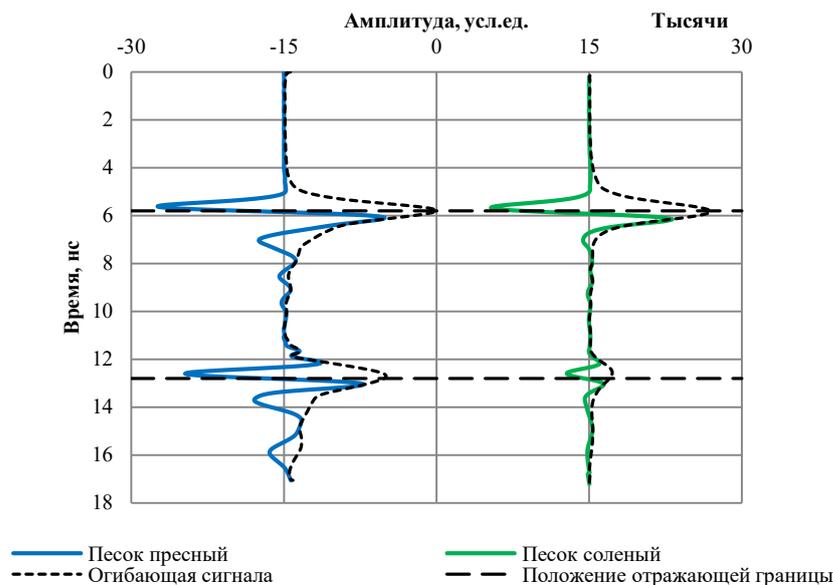


Рисунок 3.22 – Георадиолокационные трассы и их огибающие полученные на слое пресного и соленого песка в рамках однослойной модели

Как и в случае двухслойной модели из рисунка 3.22 видно, что повышение минерализации практически не изменяет скорость распространения георадиолокационного сигнала, а изменяет только амплитуду его отражений.

Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений, в сравнении с аналитическими зависимостями приведены на рисунке 3.23.

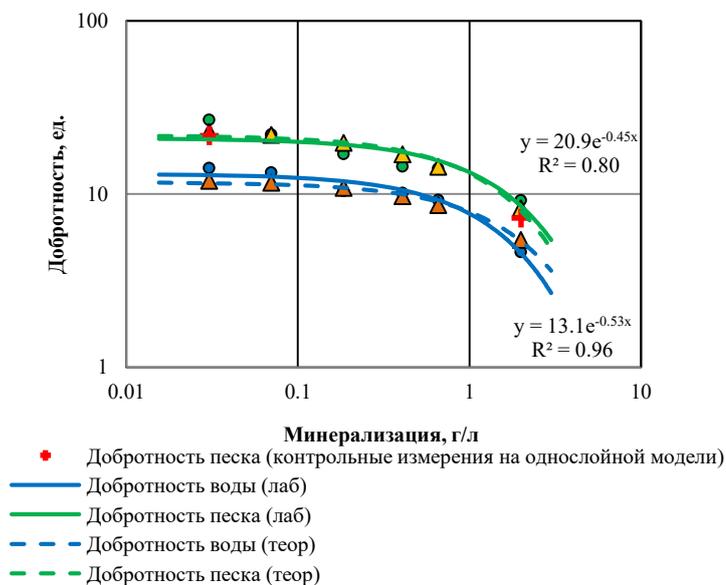


Рисунок 3.23 – Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений в сравнении с аналитическими зависимостями (метод амплитудного спада)

В качестве второго метода определения Q использовался метод спектральных отношений. Метод реализуется в частотной области и является достаточно трудоемким, но в то же время обладает большей точностью, в отличие от методов, реализуемых во временной области (Wunderlich T., Rabbel W., 2013). Параметр Q определяется путем сравнения сигналов, преобразованных методом Фурье в частотную область, до и после прохождения через поглощающую среду.

На рисунках 3.24 и 3.25 приведены спектры отраженных сигналов от границ вода-песок и песок-алюминий. С повышением минерализации наблюдается снижение центральных частот отраженных сигналов.

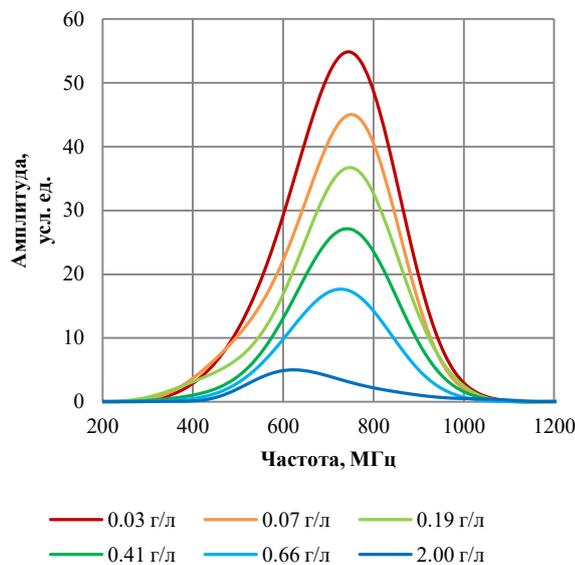


Рисунок 3.24 – Спектры отраженных сигналов от границы вода-песок

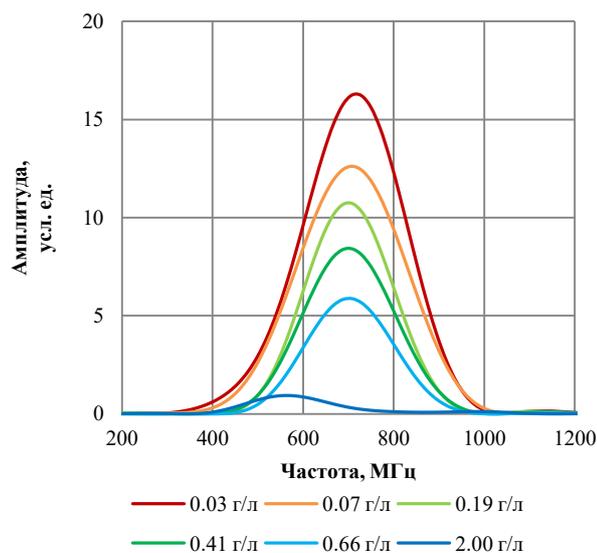


Рисунок 3.25 – Спектры отраженных сигналов от границы песок-алюминий

Линейное уравнение, описывающее спектральное отношение отраженного и исходного сигнала для добротности Q , на основании (Báth M., 1974):

$$Q = \frac{\Delta t \omega}{2 \left(\ln \left(\frac{|A_1(\omega_0)|}{|A_0(\omega_0)|} \right) - \ln \left(\frac{|A_1(\omega)|}{|A_0(\omega)|} \right) \right)}, \quad (3.21)$$

где Δt – разница между временами прихода исходной и отраженной волны, $\omega = 2\pi f$ – центральная частота сигнала, $(A_0(\omega))$ и $(A_1(\omega))$ – частотные спектры исходной и отраженной волны, $(A_0(\omega_0))$ и $(A_1(\omega_0))$ – частотные спектры исходной и отраженной волны на нулевой частоте.

Метод спектральных отношений заключается в количественной оценке частотного сдвига максима амплитуды исходного спектра источника, аппроксимируемого колоколообразной функцией Гаусса (Wunderlich T., Rabbel W., 2013). На основании данного подхода параметр добротности Q рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\gamma^2}{2\pi} \frac{\Delta t}{(f_0 - f_c)}, \quad (3.22)$$

где γ является шириной кривой исходного спектра источника, f_0 – его центральная частота, а f_c – центральная частота спектра отраженного сигнала.

Уравнение (3.22) может быть использовано для оценки параметра Q если определены f_0 и γ исходного сигнала в не поглощающей среде.

Отраженные волны, используемые для спектрального анализа, вырезались во временных окнах порядка 4нс. Исходным спектром при расчетах являлся спектр прямой волны антенны, предварительно полученный в воздухе.

На рисунках 3.26 и 3.27 приведены спектры отраженных сигналов в сравнении со спектром прямой волны в воздухе для минимальной и максимальной минерализации. На рисунках наблюдается сдвиг центральных частот спектров отраженных сигналов в сторону низких частот как относительно спектра прямой волны в воздухе, так и от слоя к слою. Кроме того, наблюдается снижение амплитуды спектров.

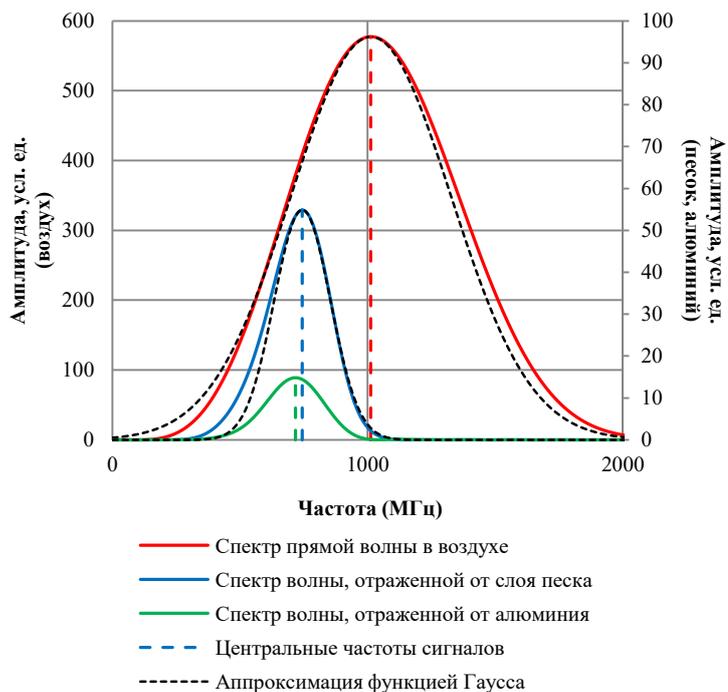


Рисунок 3.26 – Частотные спектры отраженных сигналов при минимальной минерализации

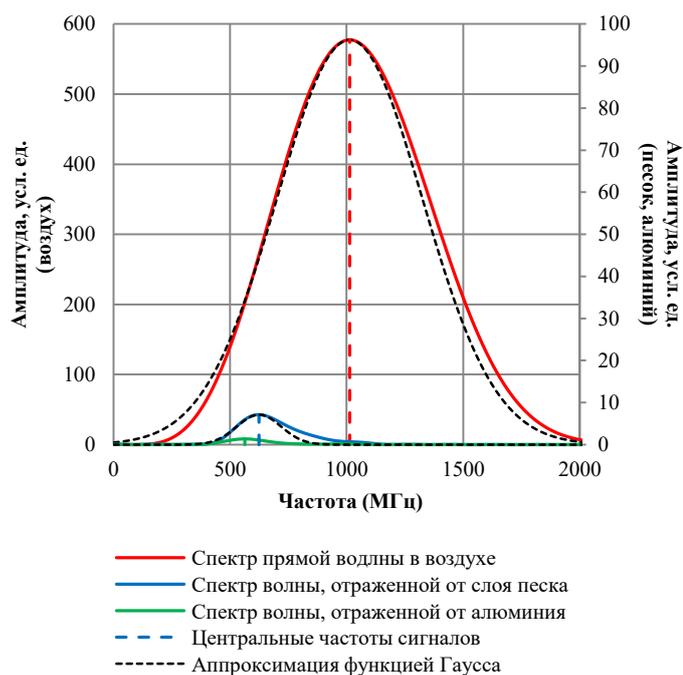


Рисунок 3.27 – Частотные спектры отраженных сигналов при максимальной минерализации

Сравнение спектров, приведенных на рисунках 3.26 и 3.27, показывает, что с увеличением минерализации воды увеличивается и величина частотного сдвига спектров.

На основании полученных частотных спектров отраженных волн методом спектральных отношений вычислены значения параметра добротности Q для первого слоя модели и

совокупности первого и второго слоев (эффективная добротность модели) при различных значениях минерализации. Добротность второго слоя рассчитана по формуле (3.20).

Значения добротности Q и удельные электрические сопротивления для воды и песка, полученные в условиях различной минерализации модели, представлены на рисунке 3.28.

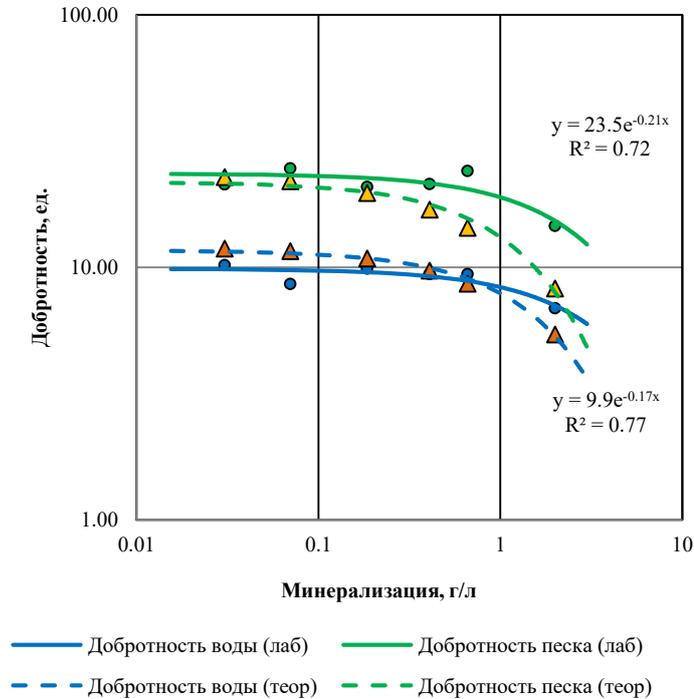


Рисунок 3.28 – Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений в сравнении с аналитическими зависимостями (метод спектральных отношений)

3.3.6 Результаты эксперимента

Сравнение результатов определения параметра добротности, полученных методами амплитудного спада и спектральных отношений, показывают, что в общем случае обе лабораторные зависимости хорошо соотносятся между собой и отвечают аналитической зависимости добротности от минерализации в диапазоне от 0.03 до 0.4 г/л (рисунки 3.23, 3.28). Зависимость, полученная методом амплитудного спада, хорошо коррелируется с аналитической на всем рассматриваемом диапазоне минерализации. Зависимость, полученная методом спектральных отношений, после перехода значений минерализации воды за пределы 0.4 г/л (что при данных значениях электропроводности слоев модели соответствует значениям тангенса диэлектрических потерь $\tan \delta$ более 0.1) начинает существенно отклоняться от аналитической в сторону увеличения добротности, как для слоя воды, так и для слоя песка. Данный эффект может косвенно указывать на ошибки определения действительной части диэлектрической

проницаемости в связи с использованием приближенной аппроксимации малых потерь формулы (1.32) (Giroux B., Chouteau M., 2010).

Тем не менее, зависимость добротности от минерализации, полученная методом амплитудного спада, как уже отмечалось выше, хорошо коррелируется с аналитической на всем рассматриваемом диапазоне минерализации и аппроксимируется экспоненциальными уравнениями с высокой степенью достоверности аппроксимации. Графическое представление результатов данного эксперимента приведено на рисунке 3.29. Пунктирными линиями показаны зависимости УЭС слоев модели от минерализации, сплошными линиями – зависимости добротности от минерализации.

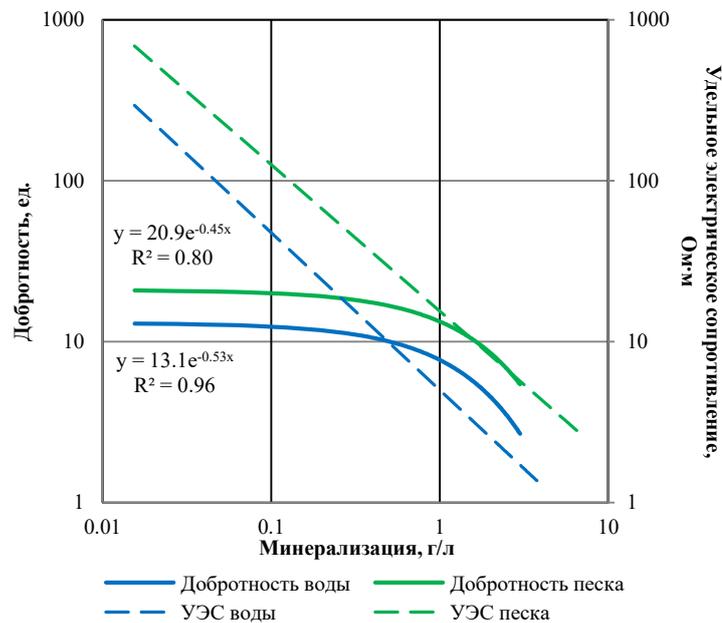


Рисунок 3.29 – Графики зависимости удельного электрического сопротивления и добротности от минерализации

Для каждого из слоев полученные соотношения добротности и минерализации лучше всего аппроксимируются экспоненциальной зависимостью. Для слоя воды и слоя песка величина достоверности аппроксимации составляет 0.96 и 0.80 соответственно.

Установлено, что экспериментально полученная зависимость добротности вещества от минерализации воды для каждого из слоев в общей форме описывается следующим уравнением:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-kM}, \quad (3.23)$$

где M – минерализация, Q – добротность слоя, Q_0 – начальная добротность слоя, к которой стремится экспериментально полученная добротность при минимальной минерализации, k – коэффициент пропорциональности.

Заметим, что между σ электропроводностью воды и ее минерализацией M при температурных условиях, в которых проводился эксперимент ($\approx 16.5^\circ\text{C}$), имеется следующая линейная зависимость:

$$\sigma \approx \frac{M}{4.8}. \quad (3.24)$$

Тогда (3.23) с учетом (3.24) примет следующий вид

$$Q \approx Q_0 \cdot e^{-4.8 \cdot k \cdot \sigma}, \quad (3.25)$$

где Q – добротность минерализованного вещества, а Q_0 – добротность вещества с нулевой минерализацией, M – минерализация воды. Для веществ рассматриваемой модели полученные значения коэффициентов Q_0 и k приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения коэффициентов Q_0 и k

<i>Вещество</i>	<i>Q_0</i>	<i>k</i>
Вода	13.1	0.53
Песок водонасыщенный	20.9	0.45

3.3.7 Выводы по разделу

Экспериментально полученные данные указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации с высокой степенью достоверности аппроксимации. Можно отметить, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность. Данное обстоятельство может являться перспективной предпосылкой для комплексирования методов сопротивления и георадиолокации в условиях, когда низкие сопротивления исследуемых грунтов могут быть обусловлены как их литологическими особенностями, так и минерализацией грунтовых вод. Кроме того, описанный подход на основе измерения добротности и электропроводности позволяет производить прямые расчеты мнимой части диэлектрической проницаемости ε'' , которая может являться важным электрофизическим параметром, характеризующим исследуемую среду, в частности, глинистость песчано-глинистого разреза. Кроме того, важным фактом, наблюдаемым в процессе эксперимента, явилось то, что скорость распространения георадиолокационного сигнала не зависит от электропроводности среды.

3.4 Определение диэлектрической проницаемости матрицы грунта

3.4.1 Модель комплексной диэлектрической проницаемости

Существует целый ряд эмпирических моделей многокомпонентных сред, которые связывают петрофизические параметры с диэлектрическими характеристиками. Среди них широкую известность и практическую значимость получила модель Торп (Торп G.C. et. al., 1980). Модель описывает зависимость диэлектрической проницаемости от влажности песчано-глинистого грунта полиномом третьей степени. Модель справедлива для диапазона частот от 10 до 1000 МГц и влажности среды, лежащей в пределах от 5 до 50 %. Точность расчетов зависит от выбора соответствующих коэффициентов полинома, получаемых на основе предварительного анализа данных, характеризующих каждый конкретный участок. Тем не менее, существует обобщенная формула, получившая широкое признание (Annan A.P., 1999):

$$\varepsilon' = 3.03 + 9.3 \cdot \theta_v + 146 \cdot (\theta_v)^2 - 76.6 \cdot (\theta_v)^3, \quad (3.26)$$

или

$$\theta_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3, \quad (3.27)$$

где θ_v – влажность грунта, характеризующегося низкими потерями и диэлектрической проницаемостью в сухом состоянии $\varepsilon_s \cong 3 - 4$. Использование данной модели часто считается неуместным для глин и грунтов, богатых органикой (Friedman, 1998), т.к. модель не учитывает мнимую часть диэлектрической проницаемости.

Модели (Curtis J.O., 2001), (Sabburg J. et al., 1997), (Dasberg S. and Нормans J.W., 1992), (Roth K et al., 1990) и (Hallikainen M.T., 1985), и некоторые другие модели, связанные с проводимостью среды, основаны на законе Арчи (Annan A.P., 1999). Использование данных моделей для многокомпонентных сред ограничено в силу отсутствия влияния эффекта релаксации и влияния мнимой части диэлектрической проницаемости. Тем не менее, они чрезвычайно полезны для определения естественной влажности (Weiler K.W. et al., 1998) и могут быть использованы в комплексе с другими моделями многокомпонентных сред для обеспечения точных результатов расчетов диэлектрической проницаемости.

Существует универсальная модель CRIM (Complex Refractive Index Model – Комплексная модель показателя преломления), рассчитанная для определения эффективной диэлектрической проницаемости широкого спектра грунтов. Модель учитывает многокомпонентность грунта и позволяет разделять общее значение диэлектрической проницаемости на дробные части, в процентном соотношении от общего объема, который занимает каждый отдельный компонент модели. В общем виде модель CRIM выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{mix}^e = \left(\sum_{i=1}^N f_i \sqrt{\varepsilon_i} \right)^2, \quad (3.28)$$

где ε_{mix}^e – комплексная эффективная диэлектрическая проницаемость смеси; f_i – объемное содержание каждого i -го компонента; ε_i – комплексная диэлектрическая проницаемость каждого i -го компонента (Ground Penetrating Radar..., 2009).

Данная модель может описать состояние трехфазного грунта на основе диэлектрических проницаемостей воды ε_w , газа (воздуха) ε_a и матрицы грунта ε_s (Shen L.C. et al., 1985). В данном случае модель CRIM примет следующий вид:

$$\varepsilon_{mix}^e = \left[(\varphi S_w \sqrt{\varepsilon_w}) + ((1 - \varphi) \sqrt{\varepsilon_s}) + (\varphi(1 - S_w) \sqrt{\varepsilon_a}) \right]^2. \quad (3.29)$$

Помимо эмпирических и полуэмпирических моделей существует многокомпонентная теоретическая модель Maxwell-De Loor (модель MD), в основе которой лежит уравнение Максвелла (De Loor G.P., 1964). Кроме всего прочего, данная модель учитывает содержание свободной и связанной воды в исследуемом грунте (Miyamoto and Chikushi, 2006). Комплексная диэлектрическая проницаемость будет выражена как

$$\varepsilon = \frac{3\varepsilon_s + 2(\theta - \theta_{bw})(\varepsilon_{fw} - \varepsilon_s) + 2\theta_{bw}(\varepsilon_{bw} - \varepsilon_s) + 2(\varphi - \theta)(\varepsilon_a - \varepsilon_s)}{3 + (\theta - \theta_{bw})\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{fw}} - 1\right) + \theta_{bw}\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{bw}} - 1\right) + (\varphi - \theta)\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_a} - 1\right)}, \quad (3.30)$$

где θ – влажность; θ_{bw} – объемное содержание связанной воды; ε_{fw} – диэлектрическая проницаемость свободной воды; ε_{bw} – диэлектрическая проницаемость связанной воды.

На рисунке 3.30 представлено сопоставление моделей Torpp, CRIM и MD.

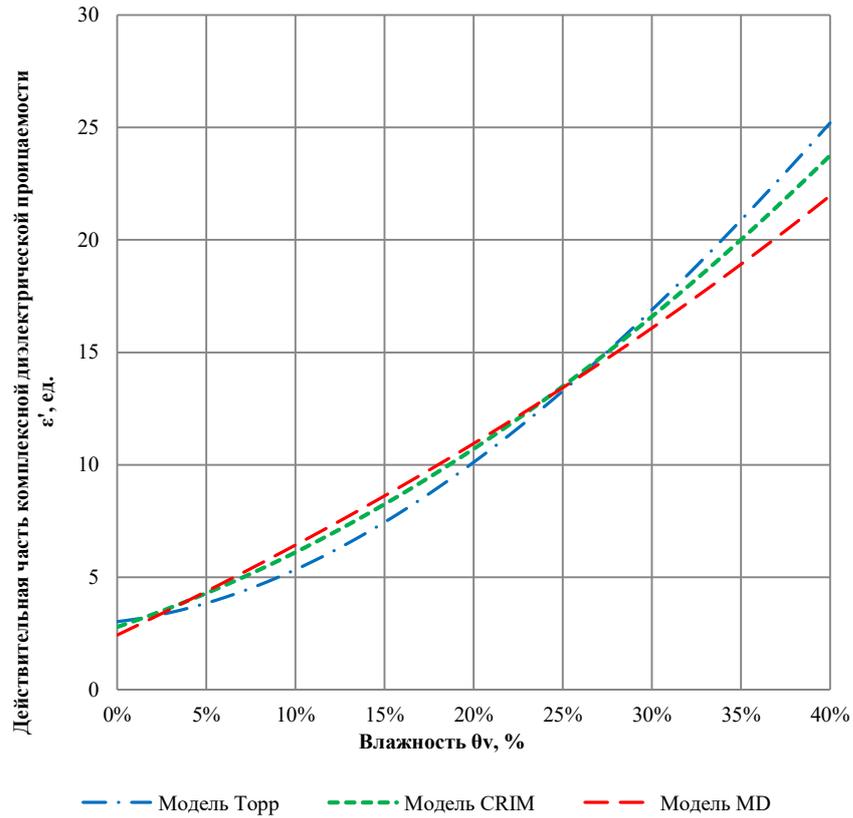


Рисунок 3.30 – Модели диэлектрической проницаемости Торр, CRIM и MD для песчаного грунта. Для расчетов использовались значения пористости и диэлектрической проницаемости матрицы грунта $\varphi = 40\%$ и $\epsilon_s = 4.5$ соответственно. Диэлектрические проницаемости воды и воздуха $\epsilon_w = 81$ и $\epsilon_a = 1$ соответственно. Содержание связанной воды не учитывалось.

3.4.2 Комплексная модель УЭС и диэлектрической проницаемости

Под водонасыщенностью S_w понимается степень заполнения порового пространства, пустот и трещин в горных породах водой. Таким образом,

$$S_w = \frac{\theta_v}{\varphi}. \quad (3.31)$$

Объединив модель Арчи в записи Humble (6) и модель Торр (3.26) через водонасыщенность, получим

$$S_w = \frac{-5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \epsilon_r^3}{2.5 \sqrt{\frac{0.62 \cdot R_w}{R_0}}}. \quad (3.32)$$

На основе комплексной петрофизической модели и экспериментально полученных при баковом моделировании электрофизических параметров песка (таблица 3.1) были рассчитаны его петрофизические характеристики. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Петрофизические характеристики песка баковой модели

<i>№ Опыта</i>	<i>Диэлект рическая проницае мость</i>	<i>Минерал изация воды, г/л</i>	<i>УЭС воды, Ом·м</i>	<i>УЭС песка, Ом·м</i>	<i>Параметр пористост и F</i>	<i>Порис тость ϕ</i>	<i>Влажн ость θ</i>	<i>Водонасы щенность S_w</i>
1	24	0.03	152	356	2.34	0.59	0.39	0.66
2	24	0.07	67	179	2.67	0.56	0.39	0.70
3	24	0.19	26	73	2.81	0.55	0.39	0.71
4	24	0.41	12	37	3.08	0.53	0.39	0.74
5	24	0.66	8	23	2.88	0.54	0.39	0.72
6	24	2	3	8	2.67	0.56	0.39	0.70

На основе рассчитанных по формуле (3.32) значений пористости ϕ , влажности θ_v и водонасыщенности S_w (таблица 1), и измеренной в лаборатории диэлектрической проницаемости грунта ε , с использованием модели CRIM (3.29) появляется возможность рассчитать диэлектрическую проницаемость матрицы грунта ε_m (с учетом того, что диэлектрические проницаемости воды и воздуха будут $\varepsilon_w = 81$, $\varepsilon_g = 1$ соответственно).

Расчет среднего значения диэлектрической проницаемости матрицы грунта ε_m по формуле (3.29) для 6 опытов составляет 2.9 ед., что хорошо согласуется со справочными значениями диэлектрической проницаемости для сухого чистого песка, приводимыми в литературе (Davis J.L., 1989).

3.4.3 Выводы по разделу

Комплексные измерения диэлектрической проницаемости и УЭС методами георадиолокации и сопротивления с использованием моделей Арчи, Торр и CRIM дают возможность рассчитывать такие важные петрофизические параметры, как пористость ϕ , влажность θ_v , водонасыщенность S_w , и кроме того определять диэлектрическую проницаемость матрицы грунта ε_m для сухого чистого песка. Данные выводы могут являться как предпосылкой, так и обоснованием петрофизического комплексирования методов георадиолокации и электротомографии.

Выводы к главе 3

Для того чтобы результаты геофизических исследований были доступны инженерам-геологам, которые являются основными потребителями геофизических данных, геофизикам необходимо использовать инженерно-геологические термины, определения и общепринятые инженерно-геологические характеристики. Методы георадиолокации и электротомографии позволяют количественно определять ряд электрофизических параметров, которые только косвенно характеризуют инженерно-геологические характеристики грунтов. Использование различных корреляционных зависимостей позволяет переводить петрофизические характеристики грунтов в инженерно-геологические. Параметр добротности является ключевым параметром, позволяющим связать методы георадиолокации и электротомографии, тем самым расширить возможности рассматриваемого геофизического комплекса для количественных оценок петрофизических и инженерно-геологических характеристик грунтов.

Алгоритм получения согласованного ЭТ-ГРЛ разреза, расширенный электрофизическими и петрофизическими расчетами, рассмотренными в данной главе, представлен на рисунке 3.31.

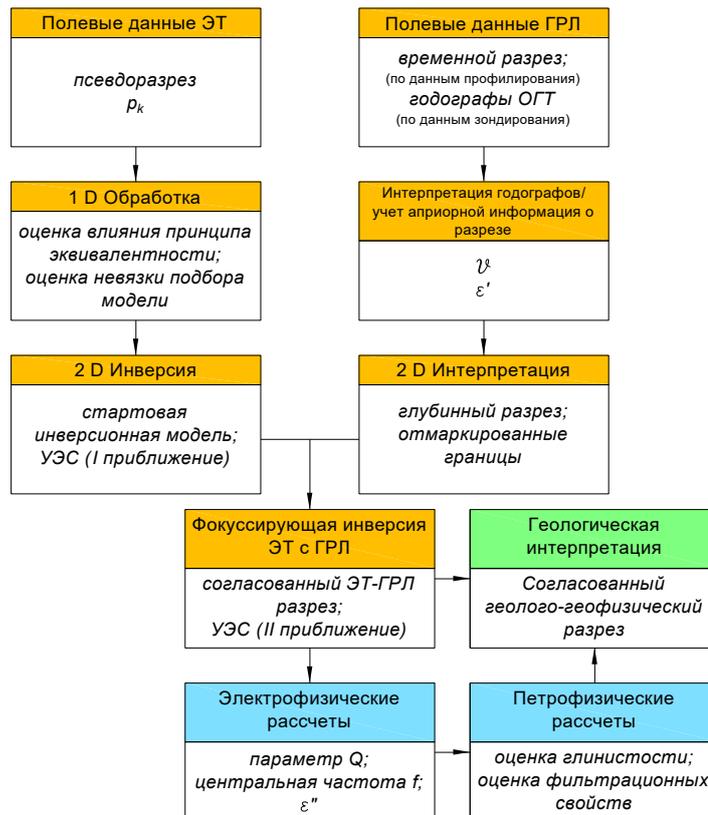


Рисунок 3.31 – Алгоритм получения согласованного ЭТ-ГРЛ разреза расширенный электрофизическими и петрофизическими расчетами

Результаты исследований, описанные в данной главе, лежат в основе второго защищаемого положения: на основе определения георадиолокационного параметра добротности и синтеза комплексной георадиолокационно-геоэлектрической модели реализуется оценка содержания глинистых частиц и фильтрационных свойств песчано-глинистых грунтов.

ГЛАВА 4 РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

4.1 Исследование песчано-глинистых разрезов оснований инженерных сооружений

Рассмотрен пример выполнения геофизических исследований методами георадиолокации и электротомографии в рамках инженерных изысканий на участке строительства железнодорожной эстакады (Лаломов Д.А., Артюгин А.И., 2014; Savin et. al., 2012). Особенностью участка является повышенный уровень техногенных помех, сопутствующих работам в полосе отвода действующей железной дороги. Помехи оказывают значительное влияние на полевые данные электроразведочных работ, увеличивая погрешность подбора электротомографической модели, тем самым снижая однозначность геологической интерпретации геофизических данных. Использование литологических границ, выделенных по данным георадиолокации, в качестве априорных данных при расчете электротомографических моделей позволяет снизить как погрешность подбора, так и влияние принципа эквивалентности (Лаломов Д.А., 2013).

Следующим этапом является расчет электрофизических параметров многослойного песчано-глинистого разреза на основе определения параметра добротности методом спектральных отношений по георадиолокационным данным. Мнимая часть диэлектрической проницаемости определяется с использованием значений электропроводности, полученным по данным электротомографии. На основе полученных значений этого электрофизического параметра даны оценки степени глинистости песчаных грунтов основания.

4.1.1 Объект исследований

Участок работ находится в районе морского порта Усть-Луга Ленинградской области в полосе отвода действующей железной дороги (рисунок 4.1). Геофизические исследования выполнялись в рамках работ по инженерным изысканиям на площадке строительства железнодорожной эстакады на 16 опорах протяженностью 500 метров.

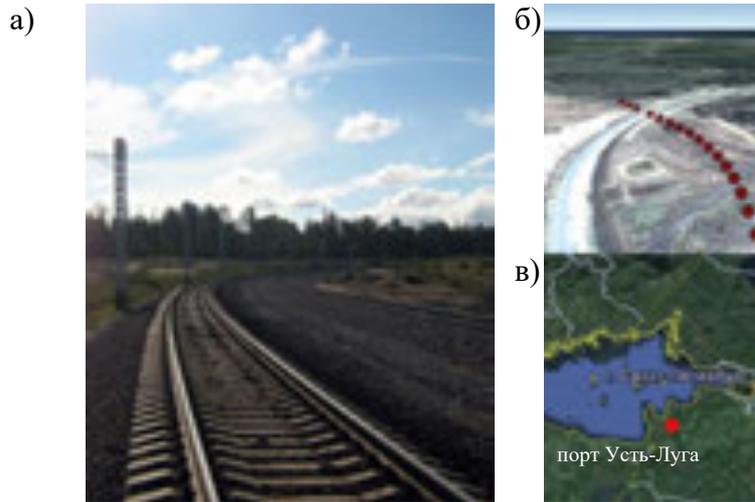


Рисунок 4.1 – Снимок существующей железной дороги (а); схема расположения опор эстакады (б); схема расположения участка работ (в)

Геологический разрез участка имеет горизонтально-слоистое строение и сложен преимущественно суглинками и супесями различной консистенции, с прослоями переувлажненного песка. Данные по одной из скважин участка с геологическим описанием приведены на рисунке 4.2.

Литологическая колонка	Описание грунта	Геол. инд.
0.1	Грунт растительного слоя	bIV
1.0	Супесь пылеватая коричневая пластичная	lgIII
2.2	Песок мелкий серый водонасыщенный средней плотности	
	Супесь пылеватая серая текучая	
5.5	Суглинок тяжелый пылеватый серый твердый	III
10.5	Суглинок легкий пылеватый серый полутвердый	
12.8	Песок пылеватый серый водонасыщенный плотный	
18.0		

Рисунок 4.2 – Геологический разрез по скважине

Особенностью участка работ является близость действующей железной дороги и сопутствующих ей источников помех, оказывающих значительное влияние на результаты геофизических измерений. В полосе отвода находятся различные подземные и наземные коммуникации, металлические конструкции, часто курсируют железнодорожные составы (рисунок 4.3).

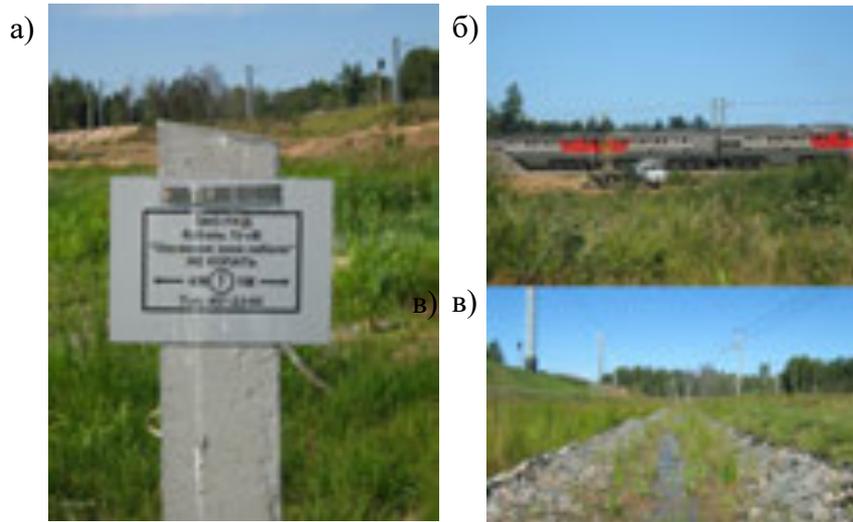


Рисунок 4.3 – Источники техногенных помех в полосе отвода железной дороги: (а) кабель высокого напряжения; (б) железнодорожные составы; (в) металлические конструкции

На рисунке 4.4 представлен график соотношения наблюдаемого уровня шумов в каналах электротомографической косы и уровня полезного сигнала вдоль осевого профиля. Видно, что при приближении к железной дороге уровень шумов значительно возрастает. На рисунке 4.5 представлены графики изоисточников для отношения наблюдаемых значений разности потенциала к силе тока, полученные по системе наблюдений трехэлектродной установки. Вблизи железной дороги наблюдается значительное число “выскоков” измеренных значений, по сравнению с другими участками, на которых “высоки” практически отсутствуют. Предварительная оценка полевых данных показала, что погрешность подбора модели на участке с низким уровнем помех составляет 4%, в то время как погрешность на участке с высоким уровнем помех достигает 15%.

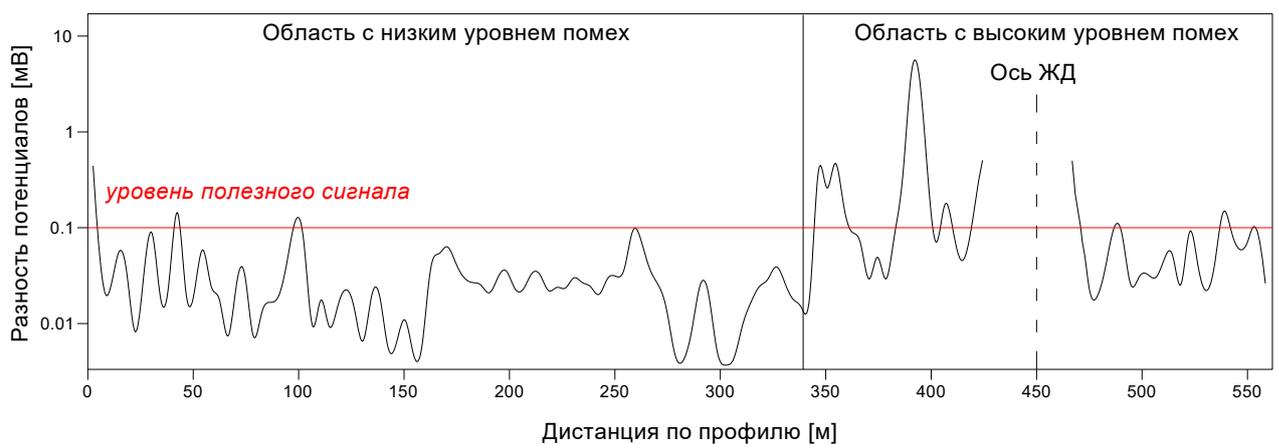


Рисунок 4.4 – График соотношения уровня помех и полезного сигнала вдоль профиля электротомографии

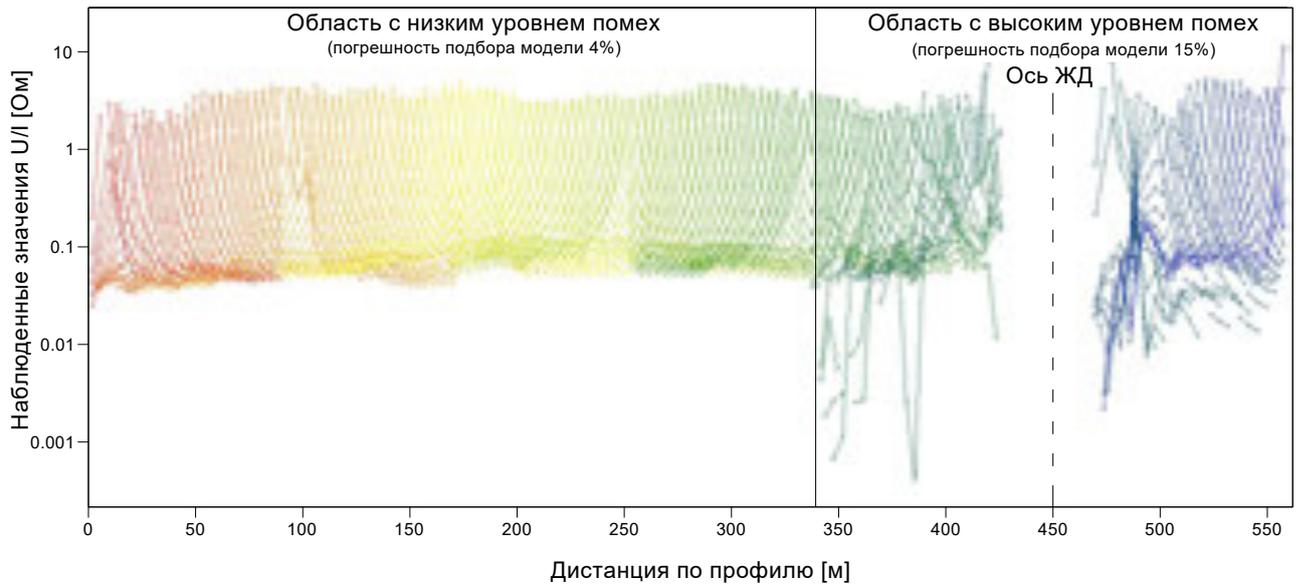


Рисунок 4.5 – Графики истоисточников наблюдаемых значений U/I

Как отмечают зарубежные специалисты, среднеквадратическая погрешность подбора электромографической модели в условиях близости железной дороги может достигать 10 % (Donohue et al., 2013), в то время как ошибка подбора в стандартных условиях обычно не превышает 5%.

4.1.2 Методика исследований

В геофизический комплекс включены методы георадиолокации и электротомографии. В качестве измерительной аппаратуры использованы комплекты георадара ОКО-2 (ООО «Логис», г. Раменское) с антенным блоком 250 МГц и электроразведочной аппаратуры EraMultimax (НПП «ЭРА», г. С-Петербург).

Вдоль оси проектируемой эстакады исследован продольный геофизический профиль. Поперечные профили располагались в местах заложения опор. Схема расположения геофизических профилей приведена на рисунке 4.6.

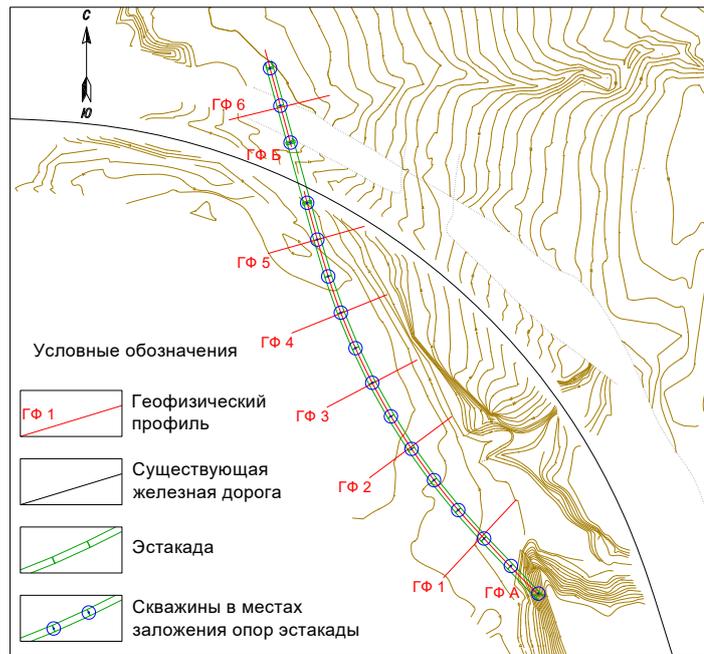


Рисунок 4.6 – Схема расположения геофизических профилей

Обработка данных георадиолокации проводилась с использованием программного пакета Geoscan32 (Руководство пользователя программой GeoScan32, 2009). Данные электротомографии обрабатывались в программах ZondMultimax и ZondRes2D (Каминский А.Е., 2012).

Для определения электрофизических параметров верхней части разреза выбран один из поперечных георадиолокационных профилей с двуслойным строением и наличием четких горизонтальных отражающих границ (рисунок 4.7). Выделяются два георадиолокационных слоя, которые по данным бурения соответствуют слоям супеси и песка фракции 0.1-0.25 мм. На глубине 2.2 метра в слое пылеватой текучей супеси наблюдается полное затухание георадиолокационного сигнала. Данный слой по инженерно-геологическим показателям относится к слабым грунтам. Пространственная привязка георадиолокационных границ осуществлялась по данным динамического зондирования в связи с тем, что данный метод, в отличие от бурения, более чувствителен к изменению литологического состава грунтов. Сопоставление двойного времени пробега Δt и глубины отражающей границы позволило определить действительную часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ' для каждого из слоев (таблица 4.1).

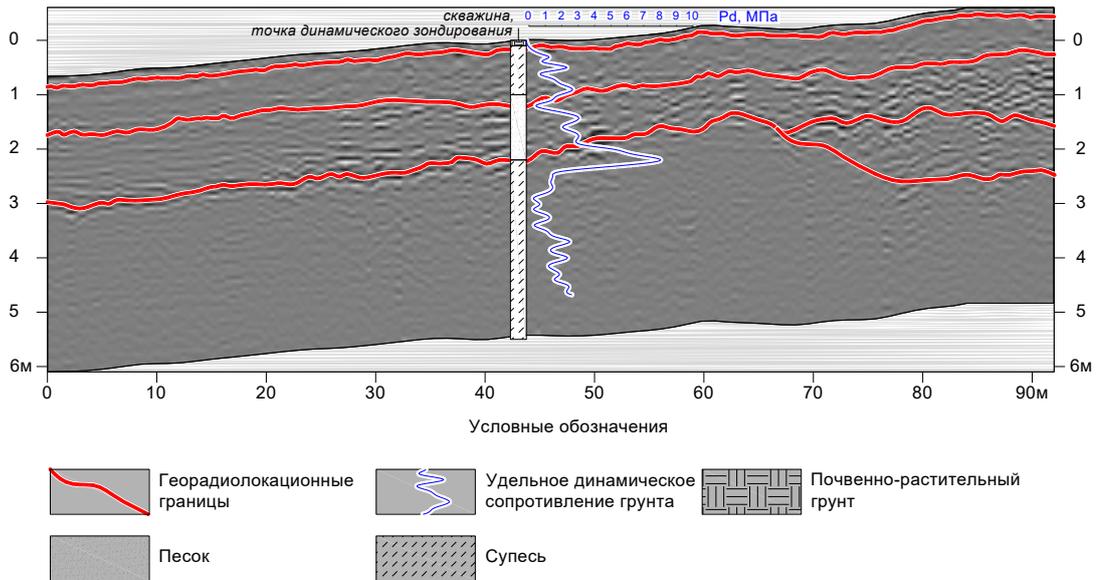


Рисунок 4.7 – Георадиолокационный разрез

Особенностью обработки данных электротомографии явилось то, что при подборе электротомографической модели в качестве априорных данных учитывалось положение границ, выделенных по данным георадиолокации (рисунок 4.8). Использование данного подхода позволило значительно снизить невязку подбора модели, особенно на участках, находящихся в непосредственной близости с железной дорогой.

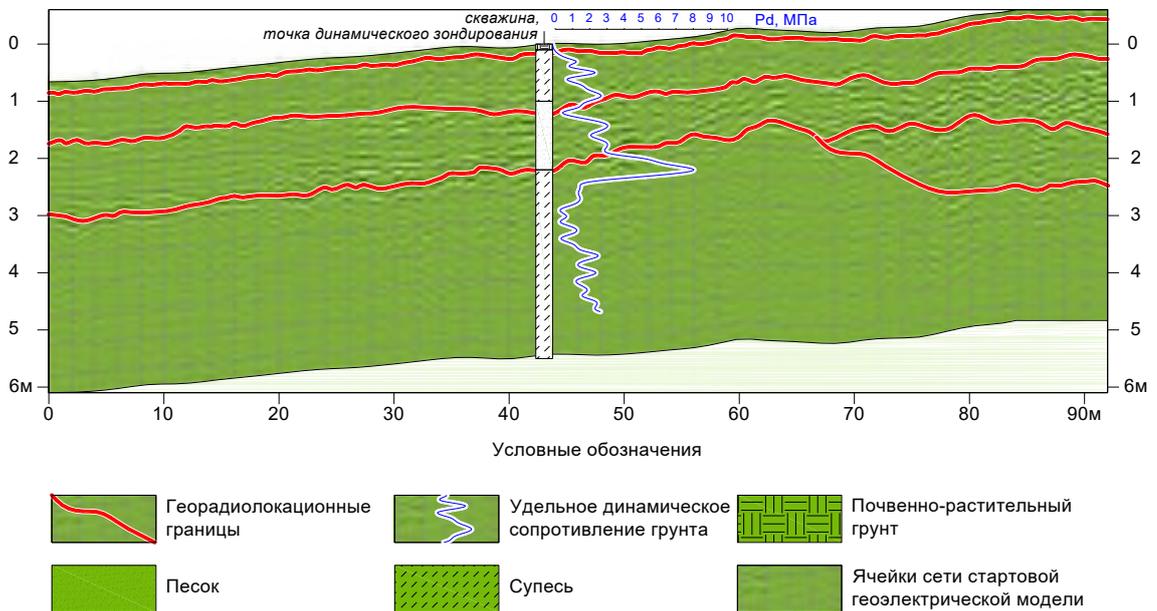


Рисунок 4.8 – Наложение георадиолокационных границ на стартовую геоэлектрическую модель

На рисунке 4.9 приведена комплексная георадиолокационно-геоэлектрическая модель. Видно, что слои супеси и песка в интервале от 0.1 до 2.2 метра объединяются в один геоэлектрический слой с удельным сопротивлением 350-400 Ом·м. При минерализации грунтовых вод участка 0.3 г/л диапазоны значений УЭС водонасыщенных песков и супесей

полностью перекрываются (Владов М.Л., Старовойтов А.В., 2004), что не позволяет уверенно разделять их по данным электротомографии. Ниже по разрезу находится низкоомная супесь текучей консистенции.

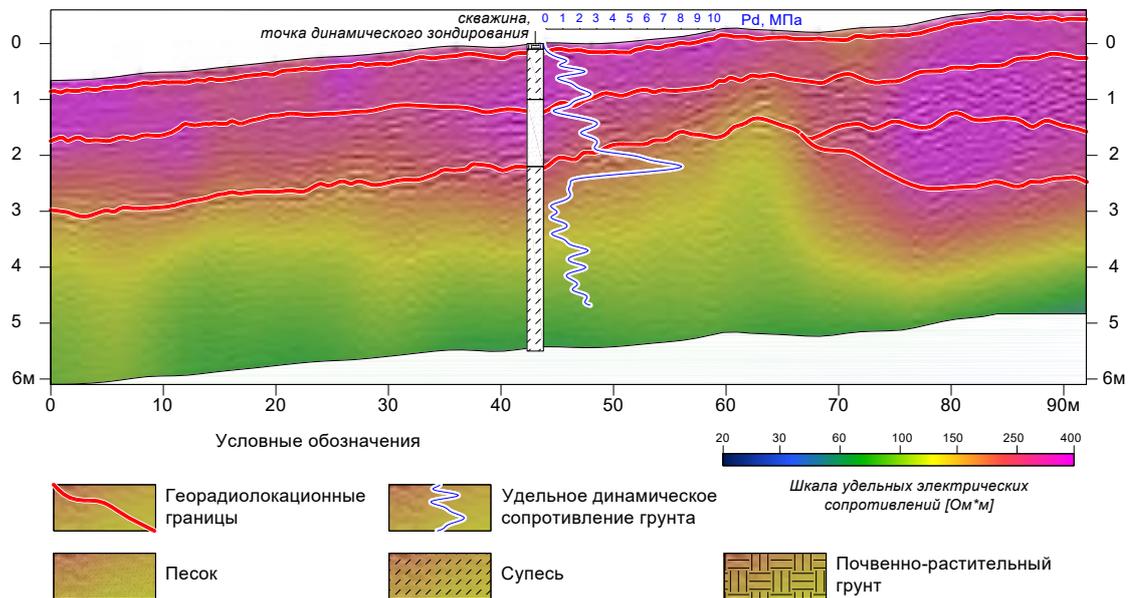


Рисунок 4.9 – Комплексная георадиолокационно-геоэлектрическая модель

На рисунке 4.10 приведены параметры верхней части разреза, полученные на первом этапе исследований на основе комплекса инженерно-геологических и геофизических методов.

Для спектрального анализа при расчете электрофизических параметров разреза в районе положения буровой выработки использовались осредненные трассы георадарного сигнала (рисунок 4.10).

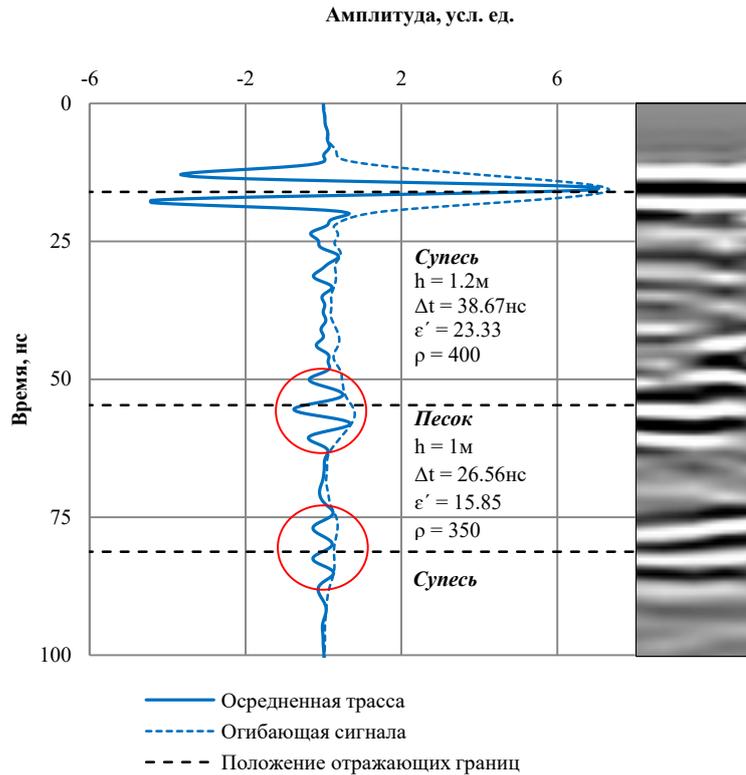


Рисунок 4.10 – Осредненная трасса. Красными окружностями выделены интервалы отраженных импульсов

На рисунке 4.11 приведены спектры отраженных сигналов в сравнении со спектром прямой волны антенны, предварительно измеренной в воздухе.

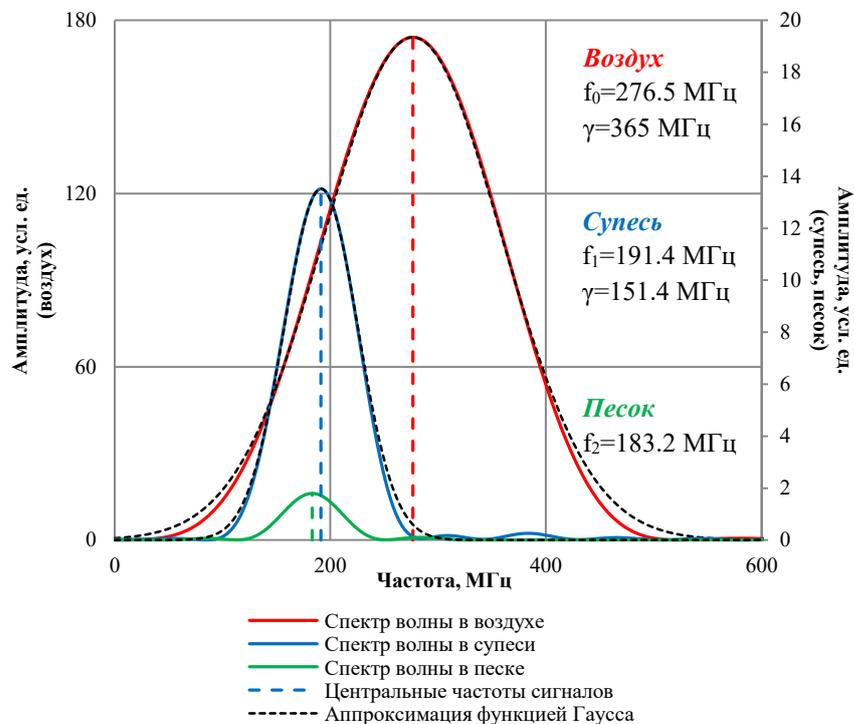


Рисунок 4.11 – Частотные спектры отраженных сигналов в сравнении со спектром прямой волны в воздухе

В таблице 4.1 представлены электрофизические параметры разреза, полученные на основании расчетов методом спектральных отношений для двуслойной среды.

Таблица 4.1 – Электрофизические параметры разреза

Слой	Геологическое описание	$h, м$	УЭС, Ом·м	Q	ϵ'	ϵ''
Слой 1	Супесь пылеватая пластичная с прослойками песка мелкого	1.2	400	9.6	23.37	2.27
Слой 2	Песок мелкий водонасыщенный средней плотности	1	350	12	15.85	1.13

4.1.3 Результаты исследований

Если действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' характеризует в первую очередь влажность грунта, то мнимая часть ϵ'' характеризует его глинистость. В случае слабой дифференциации грунтов по УЭС, значения ϵ' и ϵ'' необходимы для литологического расчленения разреза. Таким образом, результаты расчетов электрофизических параметров имеют практическую значимость для геологической интерпретации геофизических данных, полученных методами георадиолокации и электротомографии, т.к. позволяют количественно охарактеризовать достаточно тонкие прослой грунтов и сделать выводы о их литологической принадлежности.

На рисунке 4.12 приведено трехмерное представление результатов геофизических исследований методом электротомографии по всему участку работ.

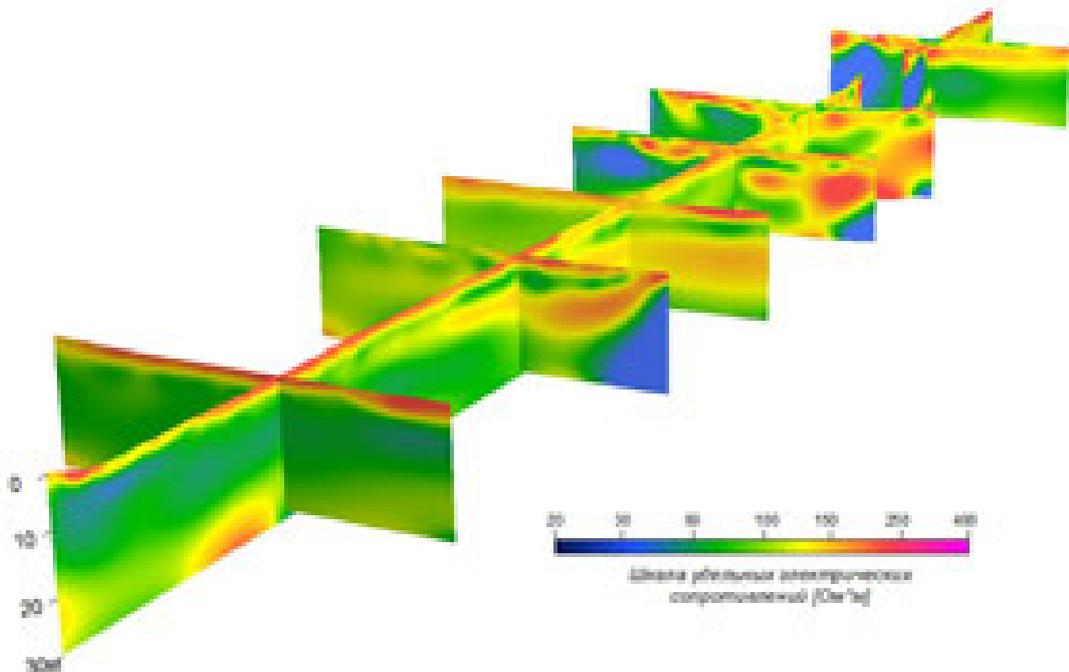


Рисунок 4.12 – Трехмерное представление результатов геофизических исследований

В центральной части участка на глубине 10-15 м выделяется мощная линза песка, которая получила отражение в повышенных значениях удельного электрического сопротивления, как на продольном, так и на поперечных профилях (рисунок 4.13). На отдельных участках выделены зоны распространения низкоомных слабых грунтов.

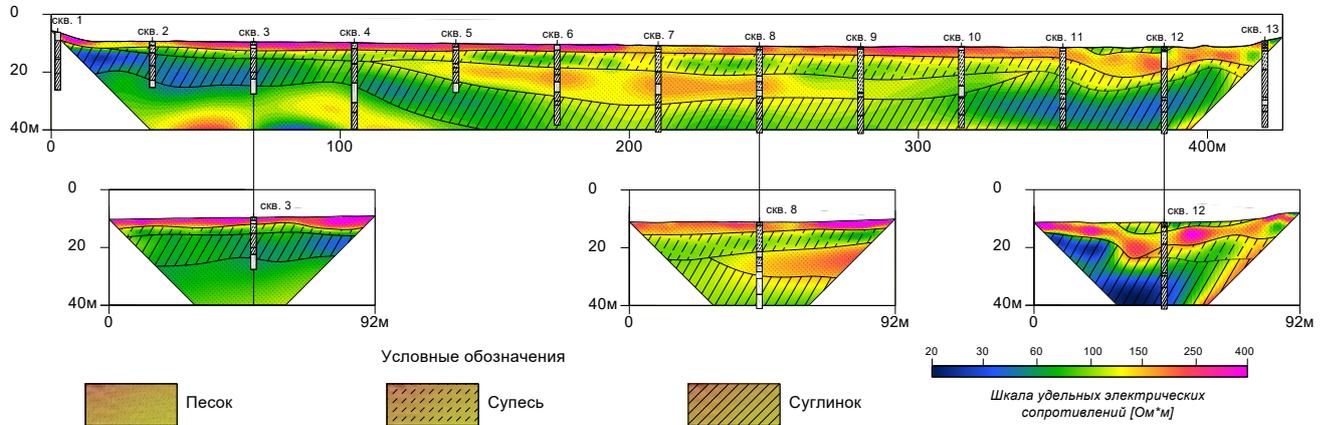


Рисунок 4.13 – Пример геологической интерпретации геофизических данных

По данным георадиолокации в верхней части разреза удалось выделить и непрерывно проследить литологические границы слоев, которые не нашли отражения на геоэлектрических моделях в силу недостаточной разрешающей способности данного метода.

Недостаточная глубинность георадиолокационных исследований вследствие затухания электромагнитной волны в глинистых грунтах, в свою очередь, была компенсирована электротомографическими измерениями.

4.1.4 Выводы по разделу

Комплексную интерпретационную модель геологического разреза по данным методов электротомографии и георадиолокации целесообразно синтезировать в два этапа. На первом этапе положение электрофизических границ, определенных на основании георадиолокационных разрезов, закрепляется при выполнении инверсии данных электротомографических наблюдений. На втором этапе результатом совместной интерпретации выступает георадиолокационный разрез, при определении электрофизических параметров которого учтены данные метода электротомографии (Glazounov V.V., Lalomov D.A., 2014).

Кроме того, расчет геоэлектрических моделей с учетом георадиолокационных данных позволяет снизить неоднозначность решения обратной задачи, обусловленной влиянием техногенных помех, сопутствующих участку полосы отвода действующей железной дороги, тем самым повысив достоверность геологической интерпретации геофизических данных.

4.2 Исследование песчано-глинистых разрезов мерзлых насыпных грунтов

Многолетнемерзлые породы получили широкое распространение на территории России во многих важнейших горнорудных, нефтяных, угольных и других районах разведки, разработки и добычи полезных ископаемых (Фролов А.Д., 1998). Освоение данных территорий напрямую связано с проектированием, строительством и эксплуатацией транспортной инфраструктуры, которая по большей части представлена линейными и площадными объектами повышенного уровня ответственности. В условиях Крайнего Севера к устройству фундаментов таких объектов выдвигаются особые требования (СП 22.13330.2011; СП 25.13330.2012), связанные с необходимостью обладать всесторонней информацией об инженерно-геологическом состоянии как насыпных грунтов, так и грунтов оснований. Специфика условий строительства на многолетнемерзлых грунтах предъявляет повышенные требования к детальности и достоверности инженерно-геологических изысканий (Кутвицкая Н.Б. и др., 2013). При освоении северных регионов приходится постоянно сталкиваться с непредсказуемым, "коварным" поведением многолетнемерзлых пород и подземных льдов. Даже в том случае, когда расстояние между скважинами и/или горными выработками невелико, получаемые в результате их опробования данные носят локальный характер, что отрицательно сказывается на их представительности и приводит к значительным погрешностям в оценке инженерно-геологических, криологических и других параметров (Артеменко И.В., 1999). Это связано с тем, что определяемые с помощью стандартного инженерно-геологического опробования параметры грунтов относятся к объемам, измеряемым кубическими дециметрами, реже метрами, в то время как для надежного геокриологического прогноза необходимо располагать интегральными инженерно-геологическими характеристиками гораздо больших объемов верхней части геологического разреза. В литературе данная проблема известна как "влияние масштабного фактора" (Огильви А.А., 1990).

В рамках инженерно-геологических изысканий на линейных и площадных объектах особую актуальность приобретают сведения, дополняющие данные бурения в межскважинных интервалах разреза. При строительстве в северных регионах практически все площадки имеют сложные, неоднородные по простиранию и глубине мерзлотно-грунтовые условия. Так, на одной строительной площадке в основании сооружений могут залегать как талые, так и мерзлые грунты сливающегося и не сливающегося типов, пластичномерзлые и охлажденные, сильно льдистые, засоленные и т.д. В таких условиях практически невозможно обеспечить требования СП 25.13330.2012 об использовании грунтов площадки (и даже отдельного сооружения) по единому принципу – в мерзлом (принцип I) или талом (принцип II) состоянии (Кутвицкая Н.Б., Манкин

М.А., 2014). Непрерывность изучения геологического разреза приобретает особую значимость, когда в насыпных грунтах и грунтах основания не исключена возможность присутствия локальных неоднородностей, способных в значительной мере повлиять как на строительство, так и на дальнейшую эксплуатацию инженерных сооружений. Недостаточная густота сети буровых работ, в данном случае, может быть компенсирована возможностями геофизических исследований по обеспечению непрерывного изучения инженерно-геологического разреза.

С учетом специфики инженерно-геологических изысканий в условиях многолетней мерзлоты для решения задач, связанных с оценкой качества искусственных песчаных оснований линейных объектов, разработан комплекс электроразведочных исследований, основанный на методах георадиолокации и бесконтактной электротомографии, о которых и пойдет речь в данном разделе.

4.2.1 Объект исследований

Объектом исследований являются площадки строительства газотранспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов полуострова Ямал (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 – Площадки строительства газотранспортной инфраструктуры на полуострове Ямал

Суровый климат, неблагоприятные мерзлотно-грунтовые условия, а также труднодоступность и малая освоенность районов многолетней мерзлоты затрудняют организацию и проведение строительных работ, что, несомненно, сказывается на качестве возводимых песчаных насыпей, строение которых может быть осложнено неоднородностями, связанными с качеством доступных строительных материалов и сжатыми сроками строительства. На рисунке 4.15 представлены примеры неоднородностей, встречающихся как на поверхности, так и в теле песчаных насыпей.

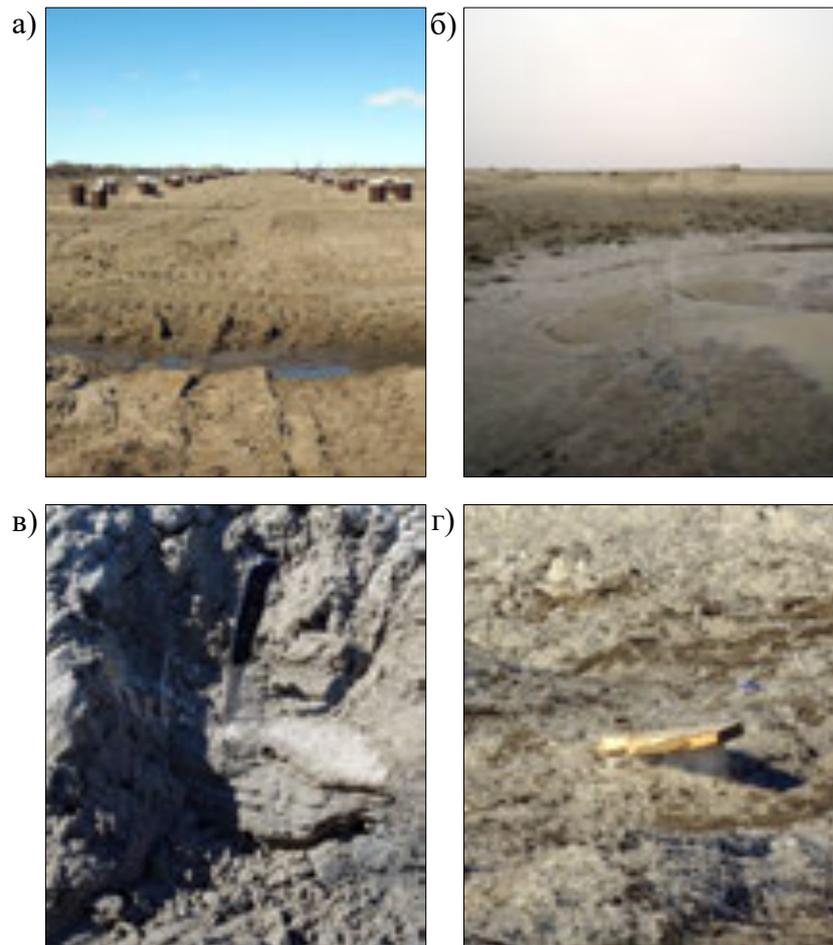


Рисунок 4.15 – Неоднородности, встречающиеся на поверхности и в теле насыпей: (а) промоина; (б) переувлажненный грунт; (в) линза льда; (г) строительный мусор

Чтобы понять, как формируются основные виды неоднородностей, рассмотрим гипотетическую модель насыпи, возведенную из привозных грунтов по классической схеме отсыпки: нижний слой в "голову" насыпи, второй слой продольной возкой (рисунок 4.16).

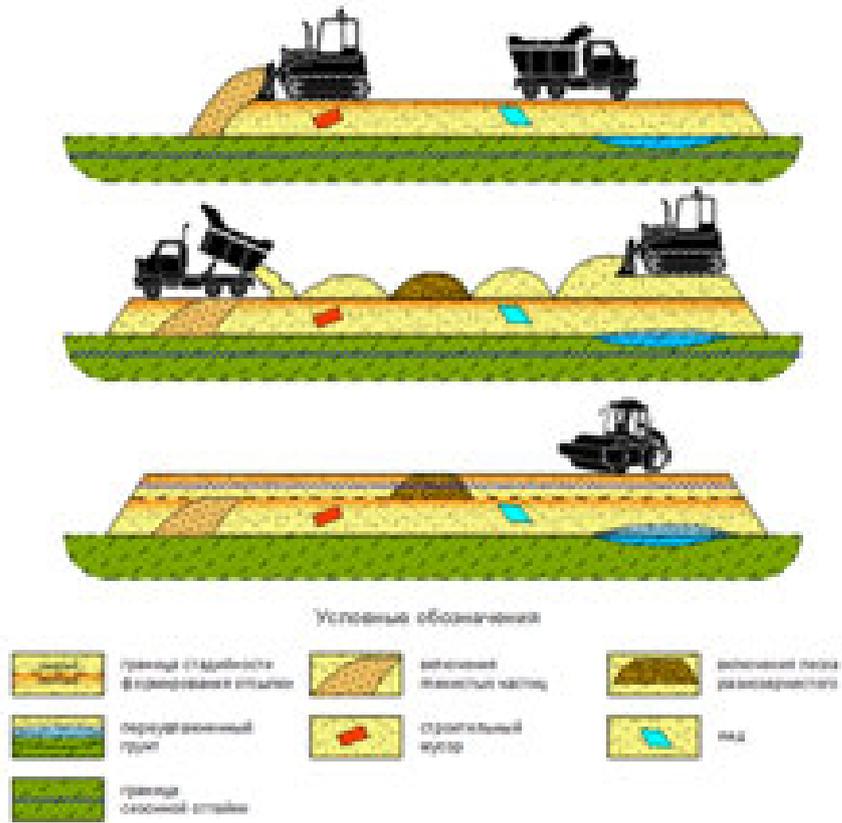


Рисунок 4.16 – Схема отсыпки насыпи из привозных грунтов: нижний слой в "голову" насыпи, второй слой продольной возкой

Помимо неравномерной слоистой структуры, связанной со стадийностью возведения насыпи, обусловленной различной степенью уплотнения отдельных слоев, в теле насыпи, на ее поверхности и в ее основании могут встретиться ледяные глыбы, строительный мусор, разнозернистые пески с различной степенью уплотнения, переувлажненные зоны, образование которых может быть связано с включениями пылеватых песков и супесей (рисунок 4.17).

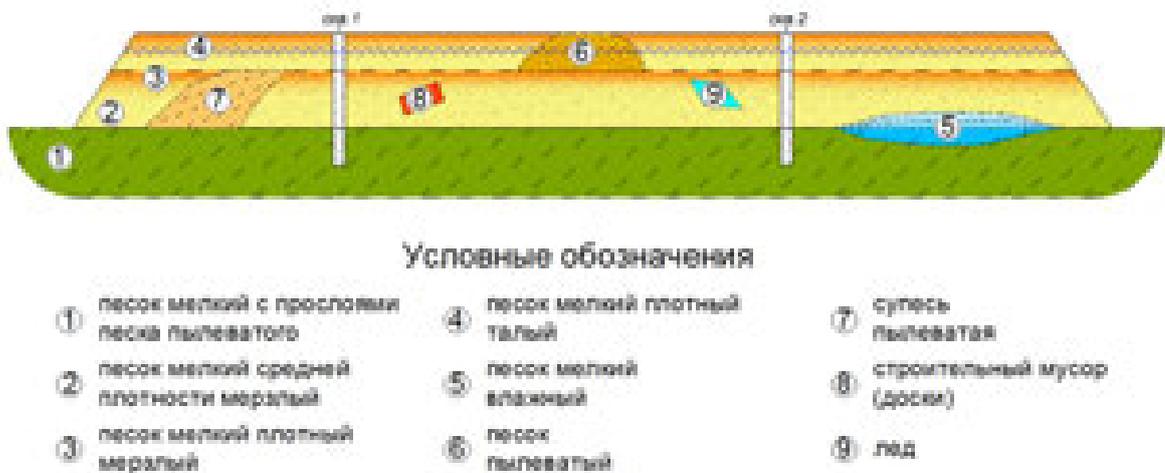


Рисунок 4.17 – Модель песчаной насыпи с неоднородностями

Таким образом, объектом исследования является песчаная насыпь горизонтально слоистой структуры, находящаяся преимущественно в мерзлом состоянии, подверженная сезонной оттайке верхнего слоя и осложненная локальными неоднородностями. Задачами, стоящими перед комплексом геофизических методов при оценке инженерно-геологических характеристик мерзлых дисперсных грунтов, согласно (Рекомендации по применению геофизических ..., 1984) является как изучение структуры массива с определением границ блоков и оценке степени их неоднородности, так и количественная оценка инженерно-геологических характеристик грунтов массива. В целях оценки качества искусственных песчаных оснований линейных объектов в условиях многолетней мерзлоты на основе комплекса геофизических методов необходимо решить следующие задачи:

- в сжатые сроки, непрерывно и по всей площади участка работ, выявить и определить характер и пространственное положение скрытых неоднородностей в теле насыпи и ее основании;
- выявить литологические границы между мерзлыми и не мерзлыми слоями насыпи и слоями с различной степенью уплотнения;
- для эффективного использования инженерно-геологических методов, в условиях их ограниченного объема и точечного характера исследований, определить оптимальное количество и расположение шурфов и скважин для формирования наиболее полной картины строения насыпи и ее основания и состава насыпных грунтов.

4.2.2 Методика исследований

Несмотря на известную аномальность физических свойств мерзлых пород (Лещиков Ф.Н., 1978), криолитозона всегда была достаточно сложной средой для исследований геофизическими методами. Как это ни парадоксально, но именно аномальность физических свойств мерзлоты по сравнению с талыми аналогами является причиной неоднозначности геофизического расчленения разреза мерзлых грунтов. С одной стороны, более широкий диапазон изменения геофизических параметров должен определять более высокую эффективность применения геофизики. А с другой стороны, многообразие состояний криолитозоны (Цытович Н.А., 1973), ее сильная литологическая изменчивость и сложные условия реализации методов зачастую сводят преимущество “аномальности” на нет и, более того, повышают фактор неоднозначности геологической интерпретации геофизических данных.

Именно поэтому первоначально выбранный для решения поставленных задач геофизический комплекс включал в себя хорошо зарекомендовавшие себя метод

электротомографии с гальваническими заземлениями, метод сейсмотомографии на преломленных волнах и метод георадиолокационного профилирования. Опытные-методические работы показали, что в существующих условиях, даже в относительно благоприятный для выполнения работ летний период, данный комплекс методов не является эффективным, ввиду полного отсутствия возможности устройства гальванических заземлений в хорошо утрамбованный верхний слой песка, в случае метода электротомографии, и значительного уровня акустических и вибрационных помех, связанных с работой строительной техники на площадке исследований, в случае метода сейсмотомографии. Несмотря на то, что на тестовых профилях работы запланированным геофизическим комплексом были все-таки выполнены, ввиду отсутствия корреляции геофизических данных с данными опорного бурения и пробоотбора качественная интерпретация полученных материалов не представлялась возможной. Единственным методом, который дал удовлетворительный результат, было георадиолокационное профилирование. Ввиду отказа от использования методов электроразведки с гальваническими заземлениями и сейсморазведки в качестве дополнительного геофизического метода был рассмотрен метод индукционной электротомографии, опыт успешного использования которого в комплексе с георадиолокацией в условиях северных районов Канады при картировании подземных льдов описан в статье (Pascale G.P. et.al., 2008). О преимуществах работы с электроразведочной аппаратурой, позволяющей выполнять бесконтактные измерения электрического поля в условиях Крайнего Севера, также подробно написано в статье (Груздев А.И. и др., 2013).

Метод георадиолокации

Георадиолокационное профилирование выполнено с аппаратурой Zond-12e (производство НПФ "Радарные системы", г. Рига) на частоте 300 МГц по стандартной методике (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Рабочий момент георадиолокационного профилирования

Метод бесконтактной электротомографии

Метод электротомографии выполнен с аппаратурой БИКС (производство ОАО "СКБ сейсмического приборостроения", г. Саратов) в режиме многоразностного профилирования с бесконтактной дипольной осевой установкой на частоте 16.5 кГц (рисунок 4.19). Размеры измерительного и питающего емкостных диполей составляли 1,25 м. Расстояния между центрами диполей составляли: 1.25, 2.5, 3.75, 5, 10, 15 м.



Рисунок 4.19 – Аппаратура БИКС

4.2.3 Электрофизические свойства грунтов на участке

Типовые георадиолокационный и электротомографический разрезы относительно однородного по данным геологического опробования участка песчаной насыпи и ее основания, полученные на этапе опытно-методических работ, представлены на рисунке 4.20 а и рисунке 4.20 б соответственно.

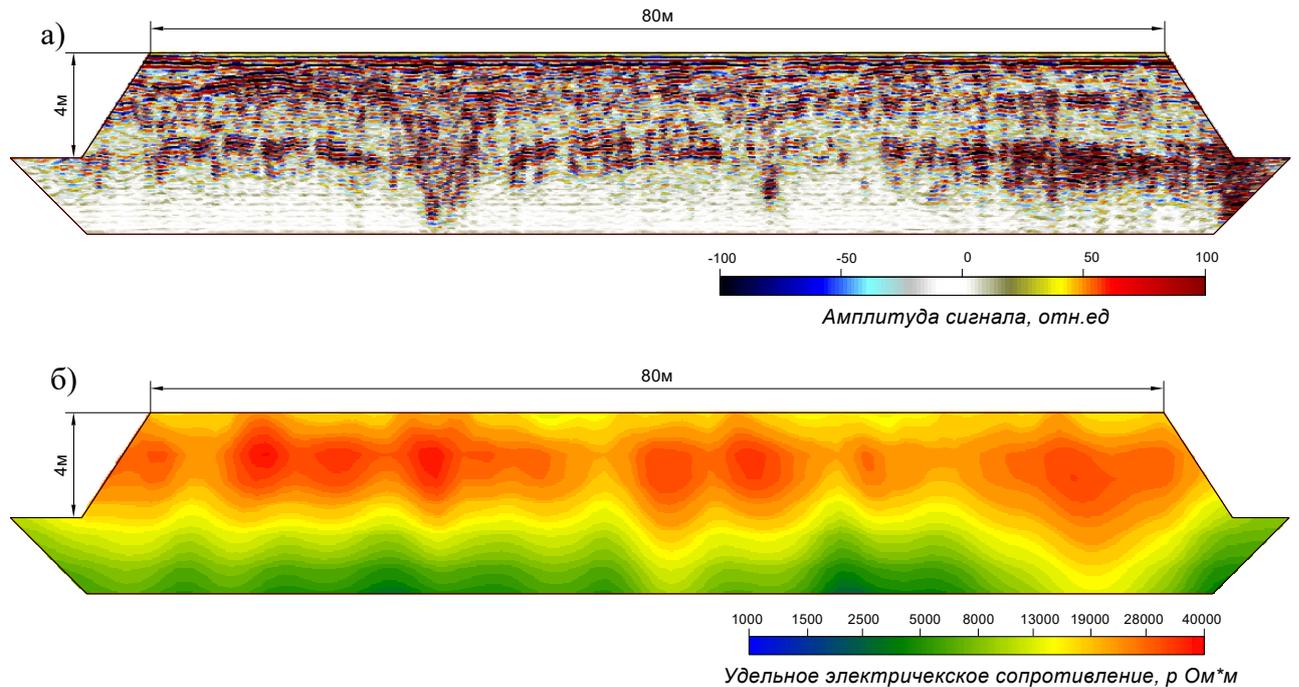


Рисунок 4.20 – (а) типовой георадиолокационный разрез песчаной насыпи и ее основания;
 (б) типовой электротомографический разрез песчаной насыпи и ее основания

По данным электротомографии на однородных участках грунты основания имеют УЭС порядка 1000 Ом*м , а насыпные грунты порядка $20\,000 \text{ Ом*м}$. Отдельно отметим, что в работе (Модин И.Н. и др., 2016) на практическом примере показано соответствие значений УЭС, получаемых бесконтактными электроразведочными комплексами на частотах 16.6 кГц , и УЭС на постоянном токе, полученных с аппаратурой с гальваническими заземлениями. Однако при работе на переменном токе следует учитывать частотную дисперсию электрических свойств среды, которая может приводить к тому, что на частотах, используемых в георадиолокации, удельное электрическое сопротивление мерзлой породы составляет десятки Ом*м , в то время как на постоянном токе оно достигает сотен или тысяч Ом*м (Бричева С.С., Крылов С.С., 2014).

На тестовом георадиолокационном профиле, пройденном от основания насыпи к ее вершине, яркая ось синфазности, появляющаяся на радарограмме в переходной зоне, соответствует подошве насыпи (рисунок 4.21). Таким образом, по сопоставлению видимой мощности отсыпки и временного георадиолокационного разреза было установлено среднее значение диэлектрической проницаемости однородных насыпных грунтов, которое составило 4 единицы.

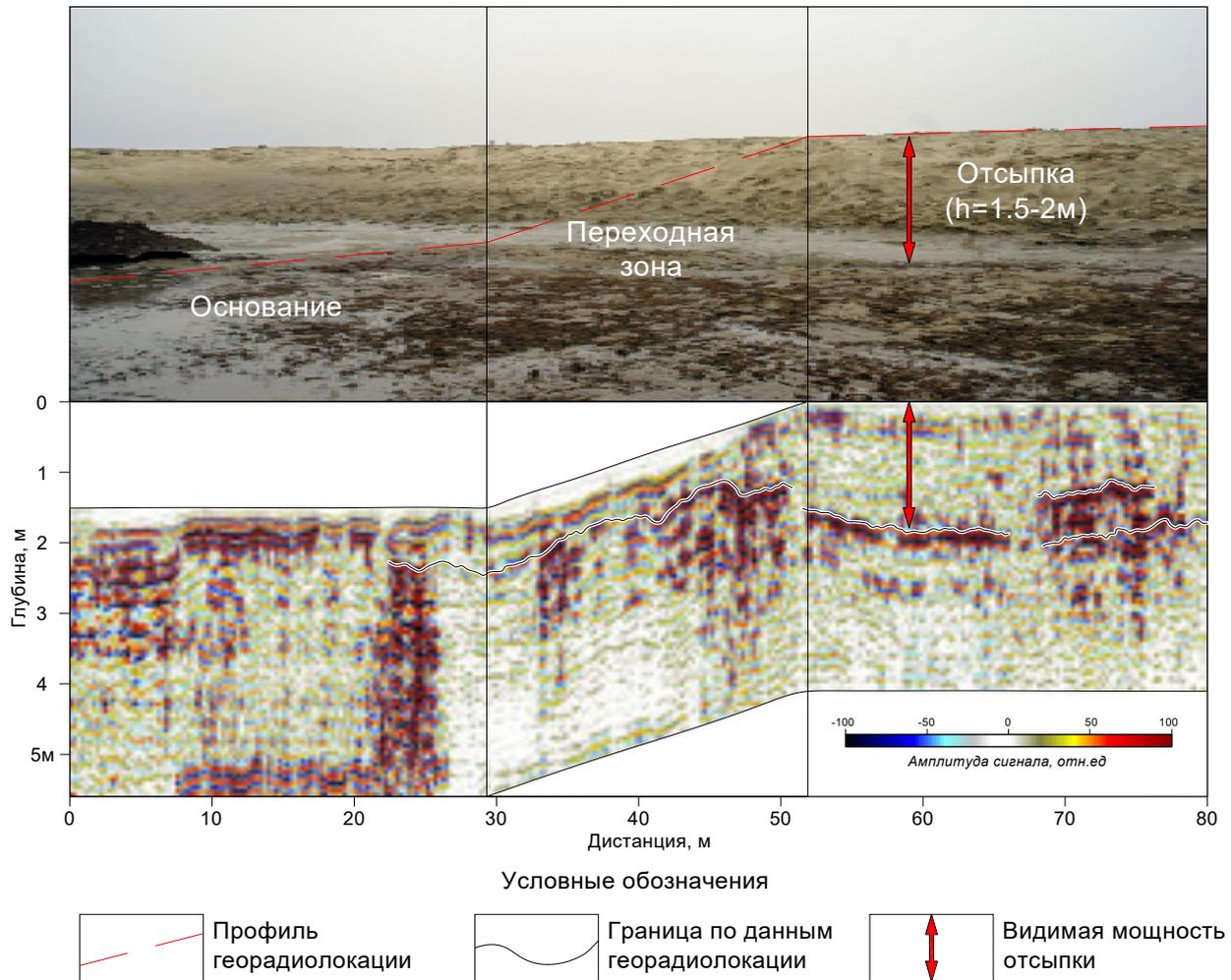


Рисунок 4.21 – Пример установления на радарограмме границы, соответствующей подошве песчаной отсыпки

На основе полученных на этапе опытно-методических исследований представлений об электрических свойствах элементов строения песчаной насыпи и ее основания, а также возможных неоднородностей, с учетом литературных данных о физических свойствах мерзлых грунтов (Фролов А.Д., 1998), составлен реестр основных элементов строения насыпи и соответствующих им значений электрофизических характеристик УЭС и диэлектрической проницаемости (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Электрофизические параметры модели песчаной насыпи

<i>Элементы строения и основные неоднородности песчаной насыпи и ее основания</i>		<i>Электрофизическая характеристика</i>	
		ρ (на 16.6 кГц), Ом·м	ε' (на 300 МГц), ед.
Грунты основания	1. Песок мелкий с прослоями пылеватого	500	20
	2. Песок мелкий средней плотности мерзлый	20 000	6
Насыпные грунты	3. Песок мелкий плотный мерзлый	30 000	4
	4. Песок мелкий плотный талый	10 000	10
	5. Песок мелкий влажный	1000	16
Неоднородности	6. Песок пылеватый	2 000	16
	7. Супесь пылеватая	150	20
	8. Строительный мусор (доски)	100 000	2
	9. Лед	100 000	1

4.2.4 Электрофизическая модель песчаной насыпи и ее основания

Моделирование – важный процесс, предваряющий полевые работы. Он позволяет выбрать оптимальные параметры системы измерений для решения поставленной геологической задачи. Кроме того, вооружившись априорной информацией об объекте исследований, интерпретатор может промоделировать различные геологические ситуации, планируя геофизические работы.

Для лучшего представления о том, как неоднородности отражаются в геофизических полях, решим прямую задачу, построив электротомографическую и георадиолокационную модели песчаной насыпи. Представленные ниже электротомографические модели построены в программе ZondRes2D (Каминский А.Е., 2012), георадиолокационные модели построены в программе MatGPR (Tzanis A., 2010).

Электротомографическая модель

На основе данных о геометрии и об УЭС основных элементов песчаной насыпи, полученных на этапе опытно-методических работ (рисунок 7 б), сформирована гипотетическая модель УЭС идеальной песчаной насыпи и рассчитана ее инверсионная электротомографическая модель (рисунок 4.22 а и рисунок 4.22 б соответственно).

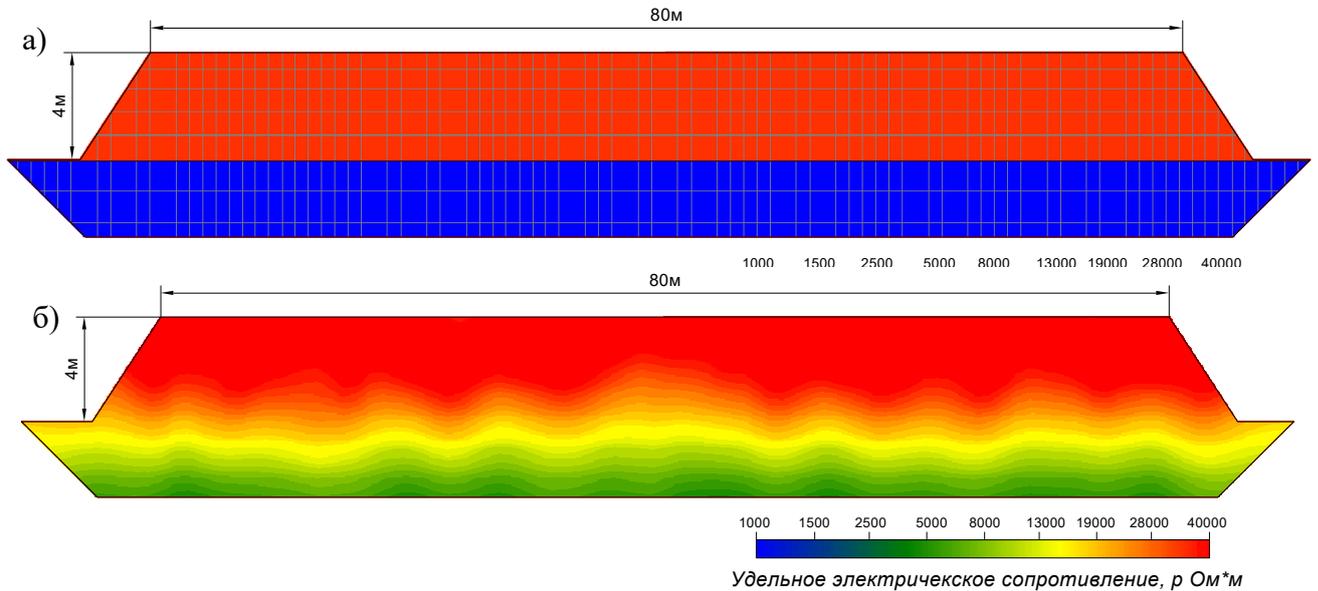


Рисунок 4.22 – (а) гипотетическая модель удельных электрических сопротивлений идеальной песчаной насыпи и (б) ее инверсионная электротомографическая модель

Особенностью полученной инверсионной модели является гладкое распределение УЭС, которое даже в случае идеальной песчаной насыпи не позволяет однозначно провести границу основания насыпных грунтов.

Модель удельных электрических сопротивлений неоднородной песчаной насыпи и ее инверсионная электротомографическая модель приведены на рисунке 4.23а и рисунке 4.23б соответственно.

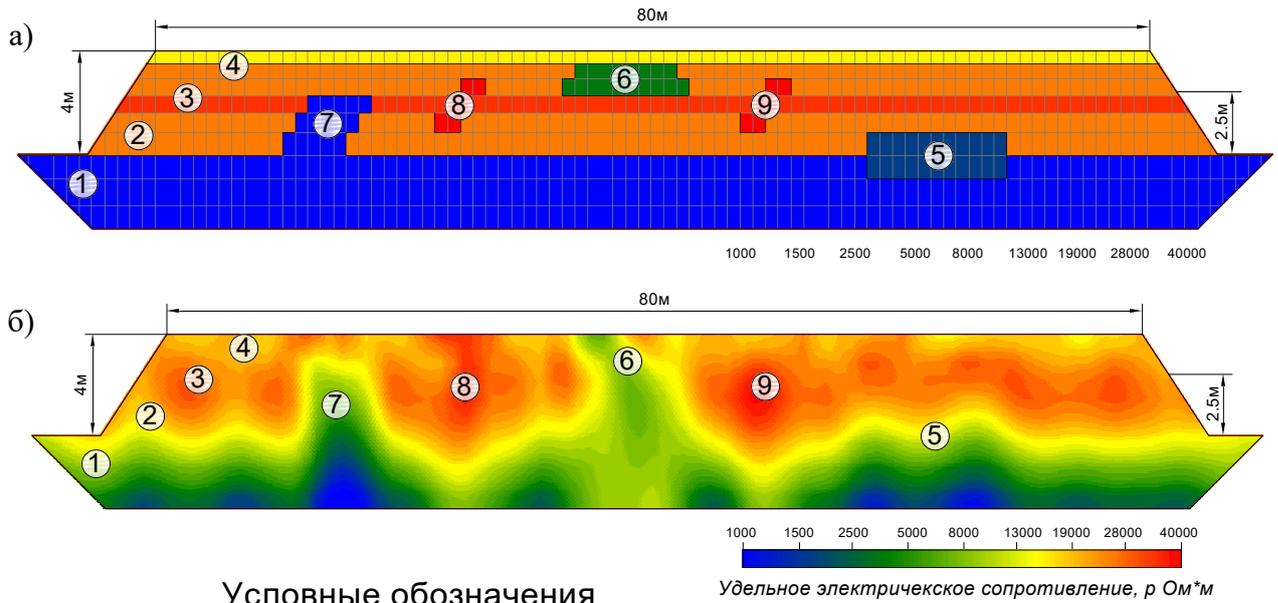


Рисунок 4.23 – (а) модель удельных электрических сопротивлений неоднородной песчаной насыпи и (б) ее инверсионная электротомографическая модель

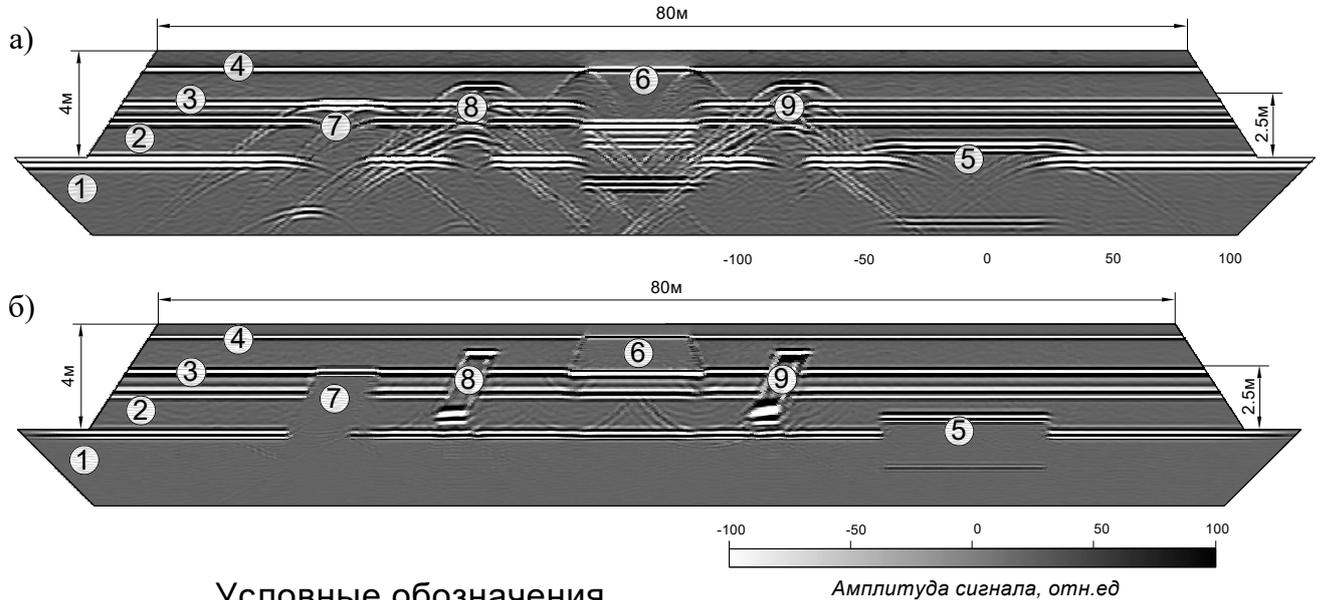
Анализ результатов моделирования показывает, что слоистая структура насыпи на инверсионной модели проявлена слабо, и очевидно, что данных электротомографии недостаточно для точного восстановления геометрии насыпи. Между тем, локальные неоднородности находят достаточно яркое отражение в том или ином изменении гладкого распределения УЭС инверсионной модели и в некоторых случаях могут быть оценены количественно.

Георадиолокационная модель

Георадиолокационная модель неоднородной песчаной насыпи и ее георадиолокационный разрез после миграции приведены на рисунке 4.24а и рисунке 4.24б соответственно.

Необходимо помнить, что на радиолокационном профиле изображаются отражённые сигналы, а не сами объекты. Отражение от локального объекта в форме гиперболы может иметь большую протяжённость вдоль профиля и может быть при интерпретации ошибочно принято за отражение от выпуклой границы раздела в грунте. Наклонные границы раздела с большим углом наклона дают отражения, изображения которых на профиле имеют совсем другой наклон, а сами

отражённые сигналы изображаются на профиле не в том месте, где реально находится наклонный отражатель. В этом случае имеет место так называемый “снос” данных, когда проекция точки отражения на поверхность не совпадает с местом, где наблюдается отражённый сигнал. Для получения изображения не сигналов, а самих объектов выполняется миграция.



Условные обозначения

- | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| ① песок мелкий с прослоями
песка пылеватого | ④ песок мелкий плотный
талый | ⑦ супесь
пылеватая |
| ② песок мелкий средней
плотности мерзлый | ⑤ песок мелкий
влажный | ⑧ строительный мусор
(доски) |
| ③ песок мелкий плотный
мерзлый | ⑥ песок
пылеватый | ⑨ лед |

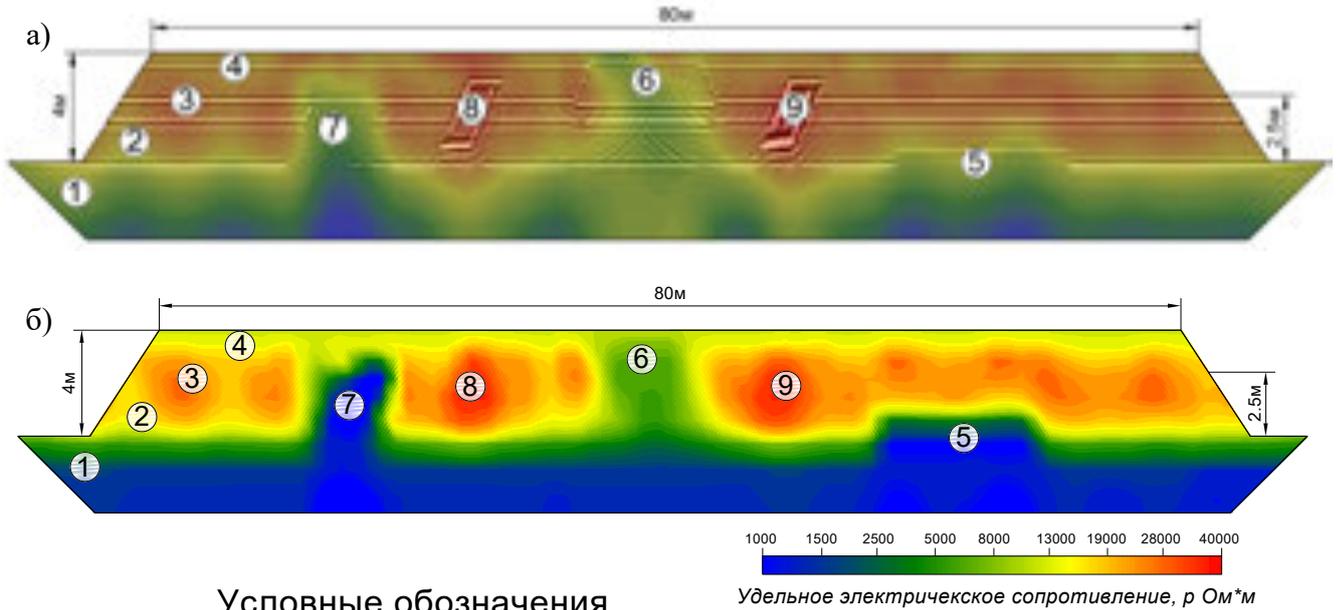
Рисунок 4.24 – (а) георадиолокационная модель неоднородной песчаной насыпи и (б) георадиолокационный разрез после миграции

Отметим, что при обработке сейсмических материалов обязательной процедурой является миграция данных (Половков В.В., 2012), преимущества которой наглядно иллюстрирует рисунок 4.24.

На георадиолокационном разрезе с достаточной точностью отразились геометрия насыпи и элементы ее слоистой структуры, что отсутствовало на электротомографической модели. Кроме того, достаточно отчетливо отразились контуры всех неоднородностей в теле насыпи, особенно их верхние кромки.

Комплексная электротомографическая-георадиолокационная модель

На рисунке 4.25 приведены совмещенная и совместная электротомографическая-георадиолокационная модели неоднородной песчаной насыпи. Недостатком совмещенной модели являются размытые значения УЭС и геометрические противоречия данных ГРЛ и ЭТ.



Условные обозначения

- | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|
| ① песок мелкий с прослоями песка пылеватого | ④ песок мелкий плотный талый | ⑦ супесь пылеватая |
| ② песок мелкий средней плотности мерзлый | ⑤ песок мелкий влажный | ⑧ строительный мусор (доски) |
| ③ песок мелкий плотный мерзлый | ⑥ песок пылеватый | ⑨ лед |

Рисунок 4.25 – (а) совмещенная и (б) совместная электротомографическая-георадиолокационная модель неоднородной песчаной насыпи

Совместная георадиолокационно-электротомографическая модель получена с использованием фокусирующей инверсии (Kaminsky A.E., Tarasov A.V., 2006) с закрепленными георадиолокационными границами. В совместной модели георадиолокационные и электротомографические данные гармонично дополняют друг друга. Отчетливо прослеживается подошва насыпи и элементы ее слоистой структуры, УЭС неоднородностей локализуются и принимают очертания своей изначально заданной геометрической формы.

4.2.5 Результаты исследований

На рисунке 4.26 приведена схема расположения геофизических профилей в пределах исследуемой площадки размером 200 на 400 м. Междупрофильное расстояние составило 20 м.

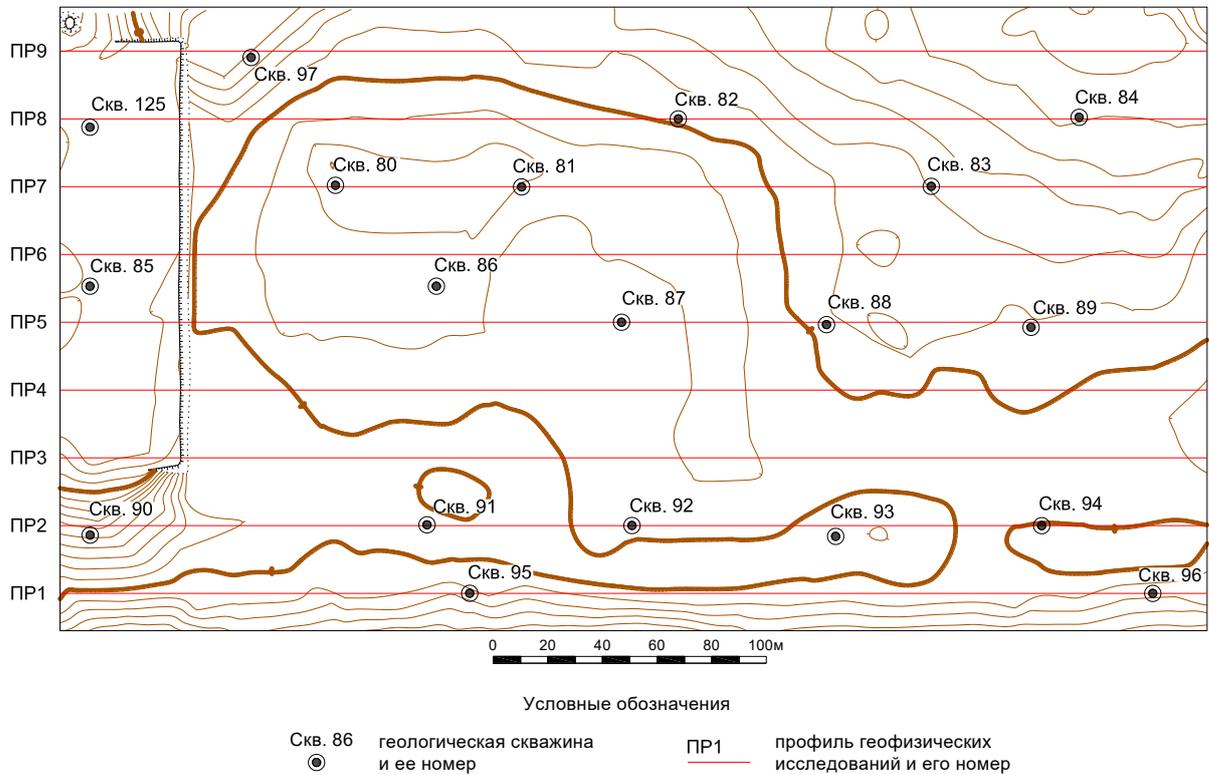


Рисунок 4.26 – Схема расположения геофизических профилей в пределах исследуемой площадки

Несмотря на достаточно большое междупрофильное расстояние, трехмерная интерполяция позволила локализовать некоторые геофизические аномалии, прослеживающиеся на соседних профилях, в аномальные зоны, как по площади участка, так и в его объеме.

На рисунках 4.27 и 4.28 приведены трехмерные электротомографическая и георадиолокационная (амплитуда отраженного сигнала, полученная после преобразования Гильберта) модели. Размер ячейки трехмерной модели составляет 4 м на 4 м на 0.2 м.

В местах наиболее ярких геофизических аномалий, характеризующих те или иные неоднородности песчаной насыпи, по площади участка были распределены геологические скважины, количество которых на площадку исследований ограничивалось двадцатью точками.

В качестве примера рассмотрим результаты геофизических исследований по одному из профилей (рисунок 4.29).

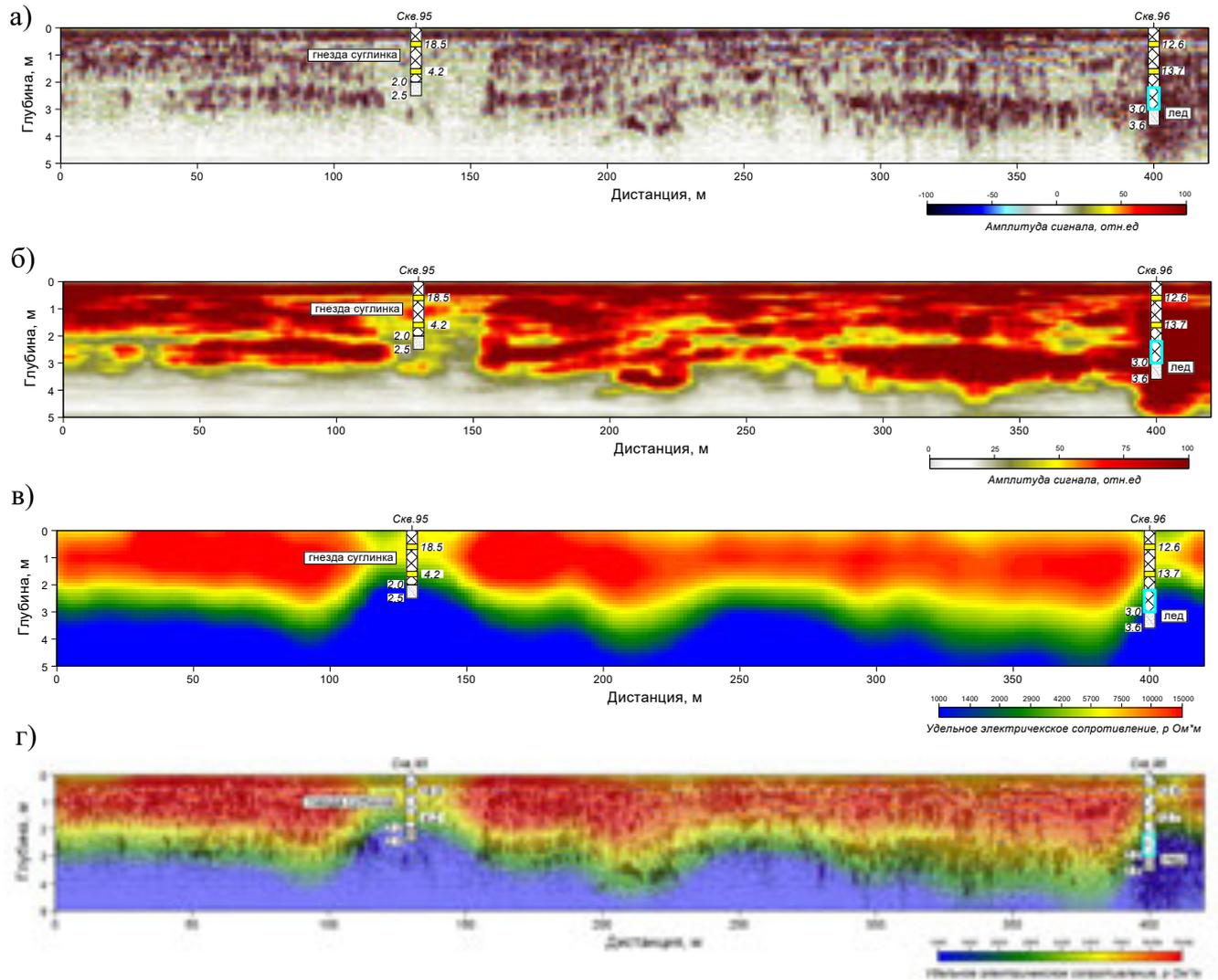


Рисунок 4.29 – Геофизические разрезы песчаной насыпи: (а) георадиолокационный разрез; (б) георадиолокационный разрез в виде энергограммы; (в) электротомографический разрез; (г) совмещенный георадиолокационно-электротомографический разрез

Анализ результатов георадарной съемки и данных бурения показал, что структура и атрибуты волнового электромагнитного поля, наблюдаемые на георадарограммах, отражают основные особенности строения и состояние грунтов насыпи (рисунок 4.29 а).

На георадарограммах отражаются изменения степени уплотнения и состава песка, его криогенная текстура и льдистость, а также положение подошвы насыпи и наличие локальных неоднородностей.

Эти особенности строения насыпи отражаются возмущениями ЭМ волнового поля, интенсивность и структура которых зависит от контрастов электрофизических свойств и строения песчаных грунтов. На энергограммах (рисунок 4.29 б), полученных после преобразования Гильберта, наблюдается некоторая корреляция между интервалами энергограмм, характеризующихся различной амплитудой отраженного георадиолокационного сигнала с участками повышенной глинистости и льдистости насыпных грунтов.

Электротомографические разрезы (рисунок 4.29 в) характеризуют непрерывное пространственное распределение УЭС песков насыпи. Интервал значений УЭС на разрезах изменяется в широких пределах: 250-18500 Ом·м. Структурное строение разреза насыпи формируют два субгоризонтальных слоя. Верхний геоэлектрический слой характеризуется повышенными значениями УЭС и соответствует песчаной насыпи, а нижний слой имеет относительно пониженные значения УЭС и соответствует грунтам основания насыпи.

Совместное рассмотрение результатов георадиолокационных и электротомографических исследований обеспечивает построение комплексной геофизической модели, которая более полно и всесторонне характеризует строение и состояние насыпи. Результаты комплексных электроразведочных исследований представлены в виде совмещенных георадиолокационных и электротомографических разрезов (рисунок 4.29 г).

На комплексных геофизических разрезах области, соответствующие различным типам волновых электромагнитных полей и геоэлектрическим комплексам грунтов, пространственно совпадают. Так, области и локальные зоны, характеризующиеся интенсивными волновыми полями, в большинстве случаев контролируются высокими значениями УЭС (рисунок 4.29 г). Уменьшение амплитуды ЭМ волн на георадарограммах коррелирует с уменьшением значений УЭС.

Массив значений огибающей георадиолокационного сигнала $\{x_i\}$ сравнивался с массивом значений удельного электрического сопротивления $\{y_i\}$ по формуле 4.1.

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4.1)$$

Полученный положительный коэффициент корреляции $r_{x,y}$ (более 60%) отражает взаимосвязь данных ЭТ и ГРЛ на большей части разреза.

Результаты, полученные независимыми электроразведочными методами, показывают, что пески, формирующие насыпь, относятся к двум основным электрофизическим разновидностям.

Пески I-ой разновидности характеризуются следующей совокупностью параметров:

- повышенными значениями УЭС от 9000 до 18500 Ом·м;
- повышенными значениями скорости распространения ЭМ волн $V=13.3$ см/нс;
- высокой интенсивностью отраженных ЭМ волн;
- слоистой структурой волнового ЭМ поля,

а пески II-ой разновидности:

- пониженными значениями УЭС от 5000 до 10000 Ом·м;
- пониженными значениями скорости распространения ЭМ волн $V=11.3$ см/нс;
- низкой и средней интенсивностью отраженных ЭМ волн;
- невыраженной структурой волнового ЭМ поля.

Геоэлектрические отличия песков насыпи можно объяснить влиянием следующих причин (Фролов А.Д., 1998):

1. Двухфазным состоянием межпоровой воды за счет повышенной минерализации воды, обусловленных засолением песков.
2. Содержанием супеси и суглинка, формирующих в насыпи единичные гнезда и пропластки.
3. Изменениями плотности песка.
4. Отличиями в степени льдистости и криогенной структуры песка.

Эти факторы определяют несущую способность песчаных грунтов, и потому наличие и размещение областей, соответствующих пескам различных геоэлектрических разновидностей, необходимо учитывать при проектировании и строительстве инженерных сооружений на возведенных насыпях. Например, участки насыпи, характеризующиеся по геофизическим данным георадиолокационной волновой картиной низкоамплитудных отражений (рисунок 4.30а) на фоне низких значений УЭС (рисунок 4.30б), по данным пробоотбора и грунтовой лаборатории соответствуют сильнопучинистым грунтам (песок пылеватый, 18.5 % частиц размером ≤ 50 мкм). Между тем, согласно (СП 25.13330.2012., 2012) подсыпку следует устраивать из непучинистого песчаного или крупнообломочного грунта. Стоит отметить, что оценка пучинистости грунта косвенными инженерно-геологическими методами по гранулометрическому составу является достаточно грубой (Шорин В.А. и др., 2013), поэтому дополнительное подтверждение пучинистости на основе геофизических данных, несомненно, является перспективным направлением использования рассмотренного комплекса геофизических методов.

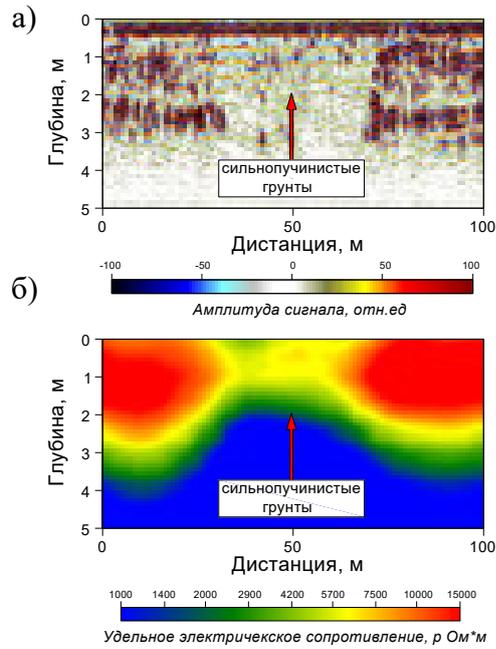


Рисунок 4.30 – Отражение сильнопучинистых грунтов в геофизических данных:

(а) георадиолокационный разрез; (б) электротомографический разрез

Дополнительная оценка однородности насыпных грунтов производилась по значениям параметра добротности, характеризующего степень затухания электромагнитной волны (Wunderlich T., Rabbel W., 2013). На рисунке 4.31а приведен георадиолокационный разрез и полученный на его основе разрез вейвлет добротности (рисунок 4.31б).

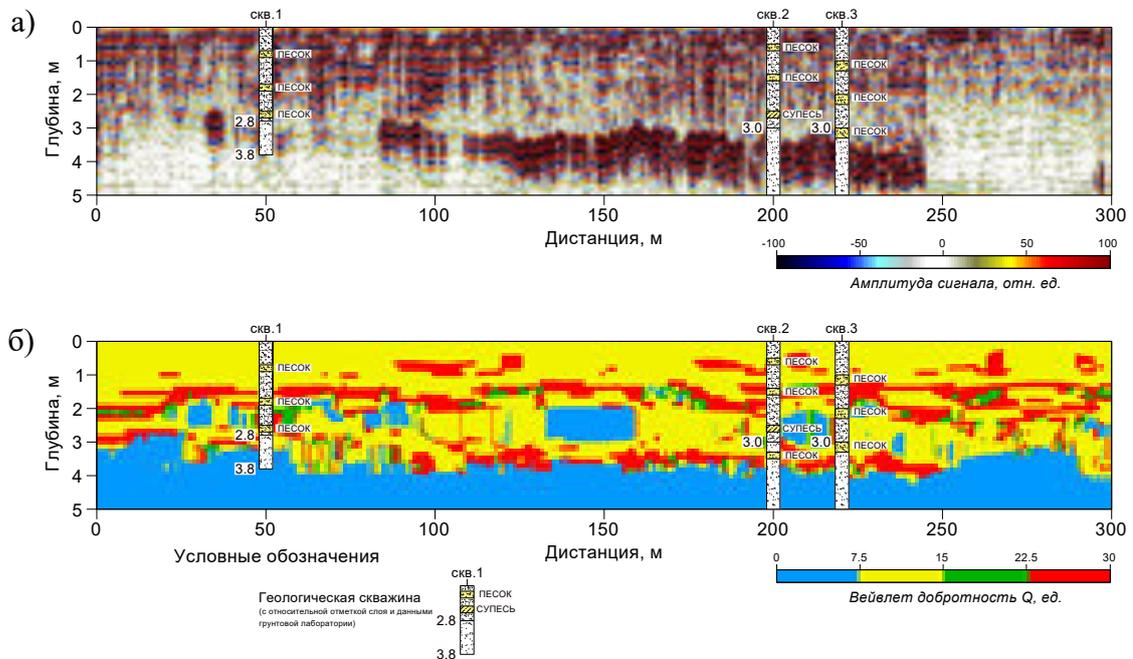


Рисунок 4.31 – Геофизические разрезы песчаной насыпи: (а) георадиолокационный разрез;

(б) разрез вейвлет добротности

Низкие значения добротности (синий цвет) характеризуют области с повышенной глинистостью, подтвержденные данными бурения и лабораторного анализа. Области высоких значений добротности (красный цвет) имеют вытянутую линейную форму, располагаются вдоль тела насыпи и связаны со стадийностью строительства и различной степенью уплотнения песчаной отсыпки. Таким образом, параметр добротности может служить дополнительным критерием оценки однородности насыпных грунтов.

4.2.6 Выводы по разделу

Комплекс электроразведочных методов, включающий бесконтактную электротомографию и георадиолокацию, является оптимальным для геофизического изучения песчаных насыпей при отсутствии возможности гальванических заземлений в условиях Крайнего Севера. Совместное рассмотрение данных электротомографии и георадиолокации позволяет получить информацию о строении насыпи и на качественном уровне охарактеризовать состояние песчаных грунтов, обеспечивая, тем самым, оценку однородности инженерно-геологического строения разрезов естественных и искусственных оснований линейных объектов транспортного строительства. Наличие в теле насыпи различных геоэлектрических разновидностей песков указывает на пространственные изменения в пределах насыпного слоя их инженерно-геологических характеристик.

Результаты комплексной интерпретации электроразведочных данных необходимо учитывать как для эффективного планирования инженерно-геологических изысканий, так и при проектировании и строительстве инженерных сооружений на песчаных основаниях искусственного происхождения (Глазунов В.В. и др., 2015).

4.3 Исследование дорожной одежды и земляного полотна

Геофизические исследования играют важную роль в индустрии транспортного строительства. Зарубежная статистика показывает, что число транспортных агентств США и Канады, использующих в своей деятельности различные геофизические методы, растет с каждым годом (Anderson N. et. al., 2008). Основным геофизическим методом в области исследования автодорог считается георадиолокация (Методические рекомендации ..., 2004). В российской Федерации георадиолокационные исследования автодорог проводятся с начала двухтысячных годов и связаны с многочисленными работами Кулижникова А.М. (Кулижников А.М., Шабашова М.А., 2000; Кулижников А.М., 2001; Кулижников А.М., 2002; Кулижников А.М., 2003; Кулижников А.М. и др. 2003). Использование георадиолокации в дорожном хозяйстве

закреплено в нормативных документах (ОДН 218.0.006-2002, 2004; ГОСТ 32836-2014, 2016; ГОСТ 32868-2014, 2015; ОДМ 218.02.37-2012, 2013; ОДМ 218.3.075-2016, 2016). В Европейском Союзе активный георадиолокационный мониторинг автодорог проводится с 2002 года. В США в 2003 году применение георадаров было одобрено дорожными департаментами в 10 штатах.

Между тем, у метода георадиолокации есть определенные ограничения, связанные с отсутствием возможности определения прочностных и вещественных характеристик слоев дорожной одежды и земляного полотна, также в георадиолокационные разрезы необходимо вносить поправки за диэлектрическую проницаемость каждого конструктивного слоя для получения корректного глубинного разреза (Данильев С.М. и др., 2015). Именно поэтому для наиболее оптимального решения задач изучения технического состояния дорожной одежды и соответствия результатов исследований требованиям (ОДН 218.0.006-2002, 2004) необходимо использовать комплексный подход, включающий не только метод георадиолокации, но и дополнительные инженерно-геологические методы. В идеальном случае это должно быть заверочное бурение в местах наблюдаемых георадиолокационных аномалий, с отбором проб и последующим их лабораторным анализом. Но, как показывает практика, выполнить заверочное бурение зачастую не представляется возможным из-за необходимости нарушить конструктивные слои автодороги, что влечет за собой потерю гарантии на период ее дальнейшей эксплуатации.

Кроме того, такое заверочное бурение требует большого числа согласований в различных дорожных службах, что еще больше ограничивает сроки, отведенные на геофизические исследования. Именно в таких условиях комплексный подход должен заключаться в привлечении дополнительных геофизических методов исследований, позволяющих на качественном и количественном уровне получать независимую информацию о строении автодороги, тем самым контролировать георадиолокационные данные. В качестве одного из таких методов предлагается использовать метод сопротивлений без заземлений (Нахабцев А.С. и др., 1985; Timofeev V.M. et al., 1994) в электротомографической модификации (Loke M.H. and Barker R.D., 1996), который хорошо зарекомендовал себя при работах в условиях отсутствия возможности гальванических заземлений (Pascale G.P. et al., 2008; Груздев А.И. и др., 2013). О комплексировании методов георадиолокации и бесконтактной электротомографии при обследовании автодорог на примере опытно-методических работ и пойдет речь в данном разделе.

4.3.1 Объект исследований

В качестве объекта для опытно-методических исследований был выбран 200 м участок новой автодороги, характеризующийся идеально ровным асфальтовым покрытием (рисунок 4.32). В центральной части участка основание автодороги пересекает бетонный коллектор.

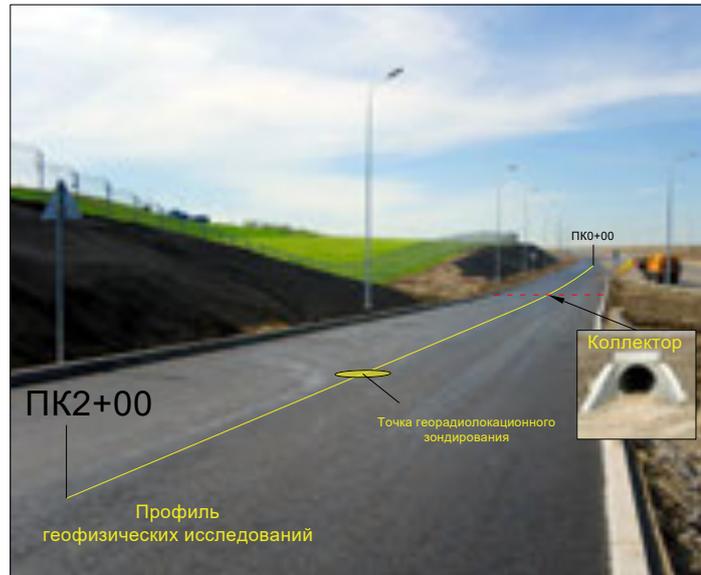


Рисунок 4.32 – Участок новой автодороги

4.3.2 Методика исследований

Учитывая, что глубинность и разрешающая способность метода георадиолокации зависят не только от электрических свойств изучаемого разреза, но и от состояния рельефа поверхностного слоя (Великин С.А., 2008), условия асфальтового покрытия являются наиболее благоприятными для георадиолокационных исследований. Минимальный воздушный зазор между антенной георадара и поверхностью исследования, сохраняющийся на протяжении всего георадиолокационного профиля, обеспечивает наибольшую величину полезного отраженного сигнала от целевых границ в теле автодороги (Изюмов С.В. и др., 2008). Данное утверждение наглядно проиллюстрировано на рисунке 4.33, где изображена двухслойная синтетическая модель с 1 см зазором между поверхностью исследования и антенной георадара, заполненным водой и воздухом.

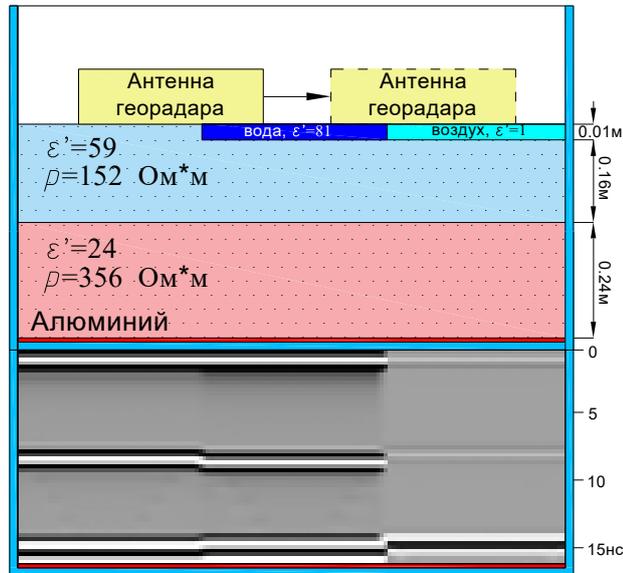


Рисунок 4.33 – Синтетическая модель с 1 см зазором между поверхностью исследования и антенной георадара, заполненным водой и воздухом

В свою очередь, для метода сопротивлений асфальтовое покрытие отнюдь не является благоприятным. Между тем, в методах электроразведки на переменном токе использование высокочастотных индукционных антенн позволяет производить измерения при отсутствии гальванических заземлений, в том числе и на асфальтовом покрытии (Kuras O. et. al., 2005). Кроме того, в работе (Модин И.Н. и др., 2016) на практических примерах показано соответствие значений УЭС, получаемых бесконтактными электроразведочными комплексами, работающими на переменном токе, и УЭС, полученных с аппаратурой с гальваническими заземлениями, работающей на постоянном токе, что очень важно для целей количественной интерпретации геофизических данных.

Метод георадиолокации

Георадиолокационное профилирование выполнено с аппаратурой Zond-12e (производство НПФ "Радарные системы", г. Рига) с антенными блоками частотой 500 МГц и 1000 МГц по стандартной методике (рисунок 4.34).

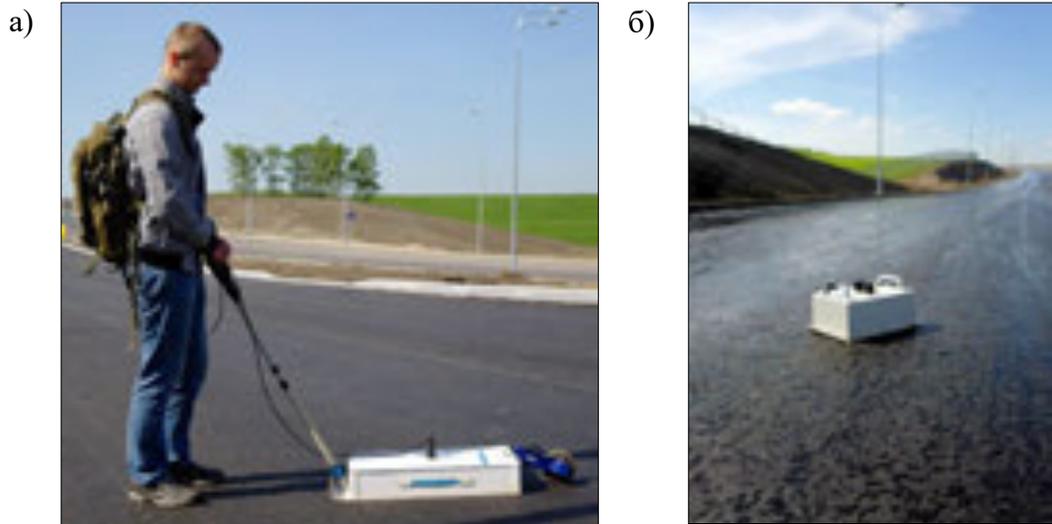


Рисунок 4.34 – Георадар Zond-12e: (а) антенна 500 МГц, рабочий момент; (б) антенна 1000 МГц

В режиме георадиолокационного зондирования использовались две отдельные антенны 900 МГц и 1000 МГц для излучения и приема сигналов и пошаговый режим записи для приема сигнала при каждом дискретном значении расстояния между антеннами по методике общей глубинной точки (Боганик Г.Н. и Гурвич И.И., 2006) (рисунок 4.35).

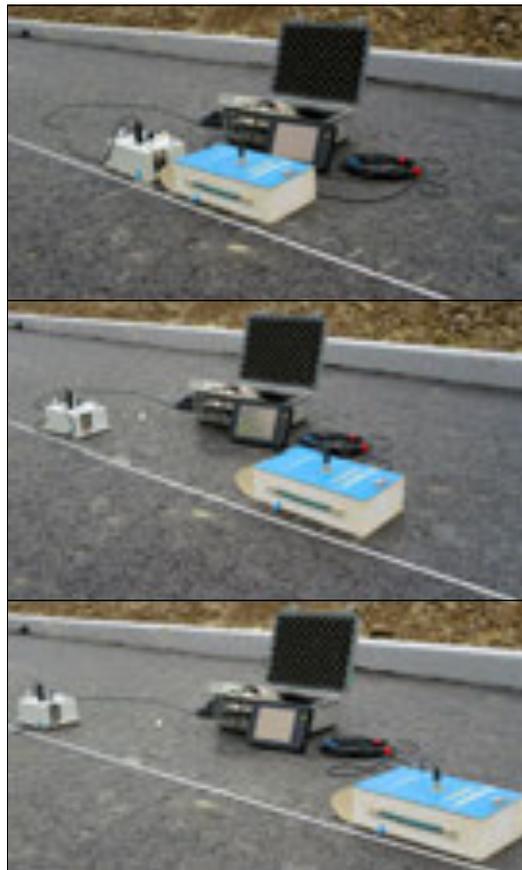


Рисунок 4.35 – Георадиолокационное зондирование

Метод бесконтактной электротомографии

Исследование методом электротомографии выполнен с использованием аппаратуры БИКС (производство ОАО "СКБ сейсмического приборостроения", г. Саратов) в режиме многоразного профилирования с бесконтактной дипольной осевой установкой на частоте 16.5 кГц (рисунок 4.36). Размеры измерительного и питающего емкостных диполей составляли 1.25 м. Расстояния между центрами диполей составляли: 1.25, 2.5, 3.75, 5, 10, 15 м.



Рисунок 4.36 – Измерительный и генераторный блоки аппаратуры БИКС

В процессе съемки дипольная осевая установка, состоящая из генераторного и измерительного блоков, многократно перемещается вдоль линии профиля с изменением разноса, т.е. расстояния между генератором и измерителем. Величина разноса изменяется для получения необходимой глубинности исследований, что и дало название методу – многоразное электропрофилирование. На основе полученного таким образом набора данных, состоящего из значений кажущихся сопротивлений с координатами точки записи и расстояниями между измерительным и генераторным диполями, рассчитывается инверсионная электротомографическая модель истинных сопротивлений (Loke M.H. and Barker R.D., 1996; Каминский А.Е., 2012).

4.3.3 Результаты исследований

Георадиолокационное профилирование

На рисунке 4.37 приведен временной георадиолокационный разрез, полученный на частоте 500 МГц. На разрезе в области 20 и 40 нс отчетливо прослеживаются две яркие георадиолокационные границы, оси синфазности которых нарушаются в центральной части

радарограммы и плавно переходят в хаотическую волновую картину. Данная волновая георадиолокационная картина отражает нарушенную структуру грунтов, связанную с укладкой бетонного коллектора в районе ПК0+90. Полученная радарограмма осложнена отдельными гиперболами дифракции от локальных объектов в теле автодороги. Выделить на радарограмме контуры бетонного коллектора не представляется возможным.

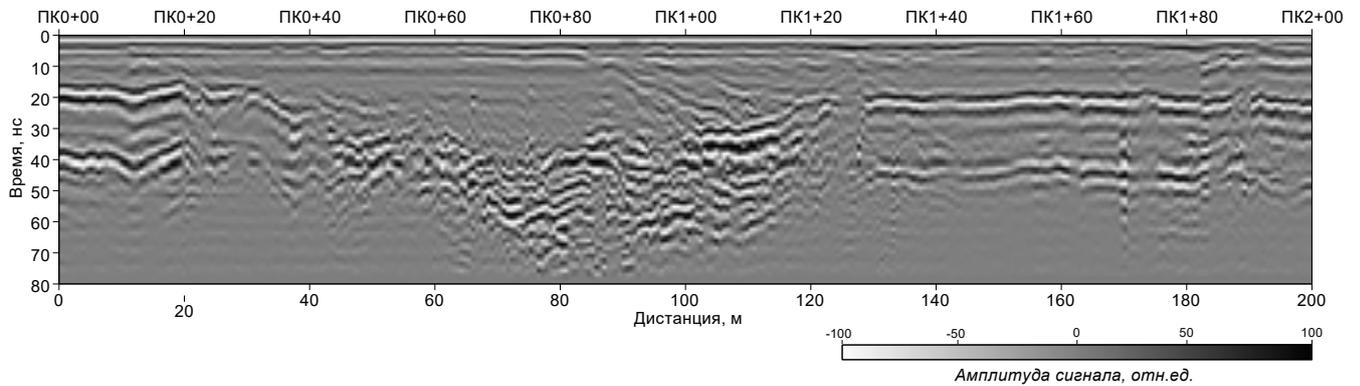


Рисунок 4.37 – Временной георадиолокационный разрез, полученный на частоте 500 МГц

Временной георадиолокационный разрез, полученный на частоте 1000 МГц, приведен на рисунке 4.38. На разрезе отчетливо прослеживается одна георадиолокационная граница, соответствующая верхней границе, полученной на частоте 500 МГц. Ниже 30 нс георадиолокационные отражения отсутствуют, что свидетельствует о высокой степени поглощения высокочастотного электромагнитного излучения грунтами разреза.

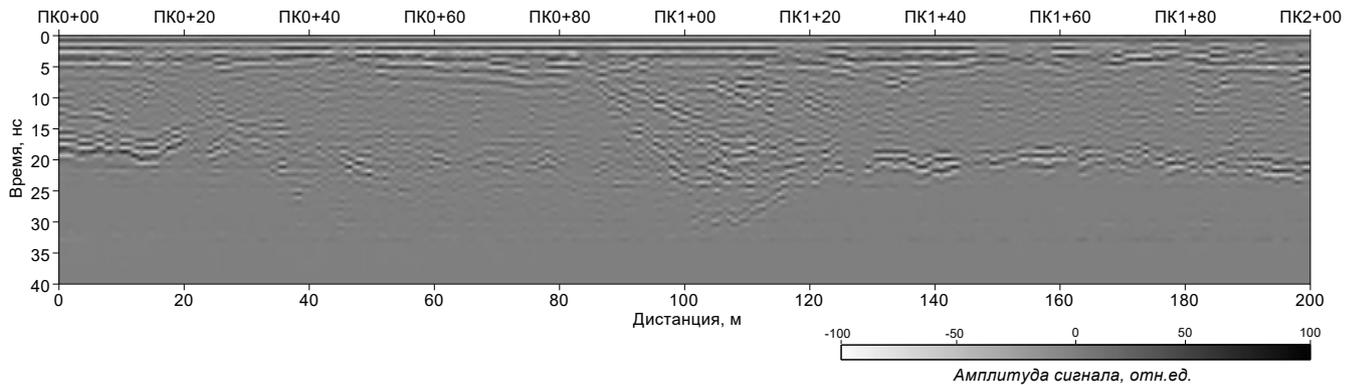


Рисунок 4.38 – Временной георадиолокационный разрез, полученный на частоте 1000 МГц

Георадиолокационное зондирование

Для корректного перехода от временного вертикального масштаба записи к глубинному масштабу выполнено георадиолокационное зондирование. Точка зондирования выбрана на участке ПК1+50, где наблюдаются яркие, хорошо выдержанные по горизонтали оси синфазности на 20 и 40 нс. Ансамбль трасс георадиолокационного зондирования приведен на рисунке 4.39.

Зондирование выполнено на частоте 1000 МГц и ограничилось временной разверткой записи 40 нс, обусловленной высокой степенью затухания георадиолокационного сигнала, позволившей выделить годограф отраженной волны только для верхней границы, тем самым определить скорость распространения электромагнитной волны только в верхнем слое.

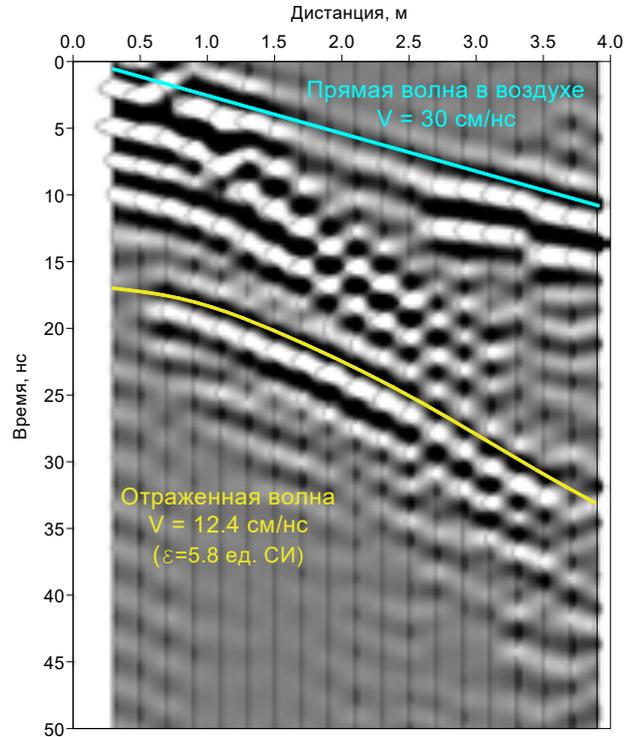


Рисунок 4.39 – Ансамбль трасс георадиолокационного зондирования с выделенными годографами прямой и отраженной волны

Полученный скоростной закон позволил, во-первых, выполнить корректный переход от временного масштаба к глубинному (рисунок 4.40) без использования априорной информации о разрезе, а во-вторых, задать параметры для выполнения процедуры миграции. Отдельно отметим, что, несмотря на то, что на временном разрезе наблюдались отдельные гиперболы дифракции, скорость электромагнитной волны определялась по ним довольно условно и лежала в широких пределах от 11.3 до 13.4 см/с (рисунок 4.40). По результатам зондирования скорость определялась практически однозначно и составила 12.4 см/нс, что лежит в пределах диапазона скоростей, определенных по гиперболам дифракции, и соответствует значению диэлектрической проницаемости 5.8 ед. СИ. После выполнения миграции и перехода из временного масштаба в глубинный гиперболы дифракции на радарограмме локализовались в отдельные яркие отражения.

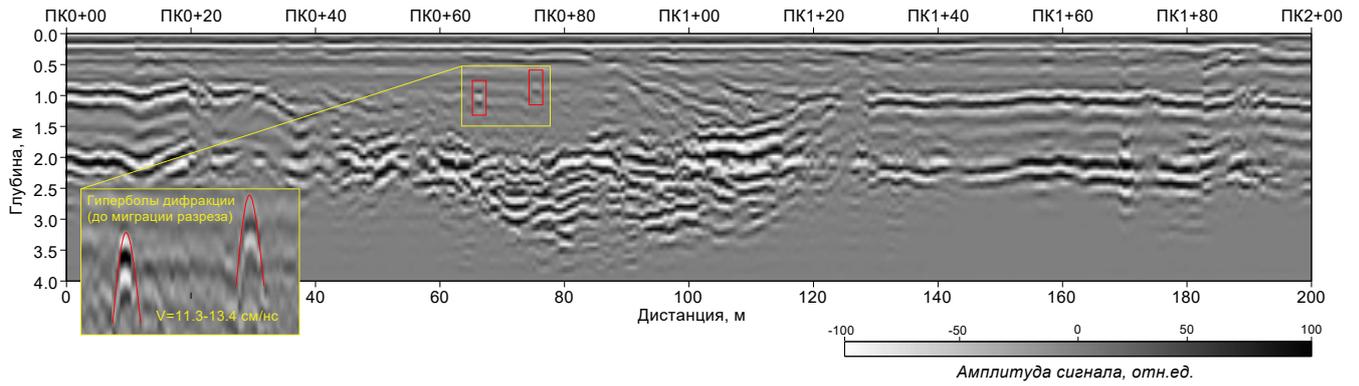


Рисунок 4.40 – Глубинный георадиолокационный разрез, полученный на частоте 500 МГц после процедуры миграции

Преимущества процедуры миграции также наглядно иллюстрируют фрагменты радарограмм, приведенные на рисунке 4.41, где видно, что георадиолокационная запись становится более сфокусированной.

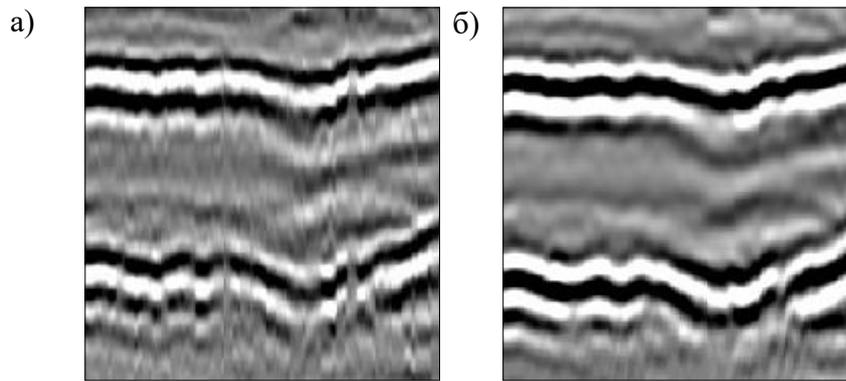


Рисунок 4.41 – Фрагмент георадиолокационного разреза: (а) до миграции; (б) после миграции

Определение параметра добротности

Количественная интерпретация георадиолокационных данных заключалась в расчете параметра добротности Q .

С использованием соотношения (3.19) по осреднённым трассам радарограмм, полученным в районе ПК1+50 для верхнего слоя, ограниченного первой яркой осью синфазности, были получены значения параметра добротности 4.9 и 4.7 ед. для частот 1000 МГц и 500 МГц соответственно (рисунок 4.42а и рисунок 4.42б).

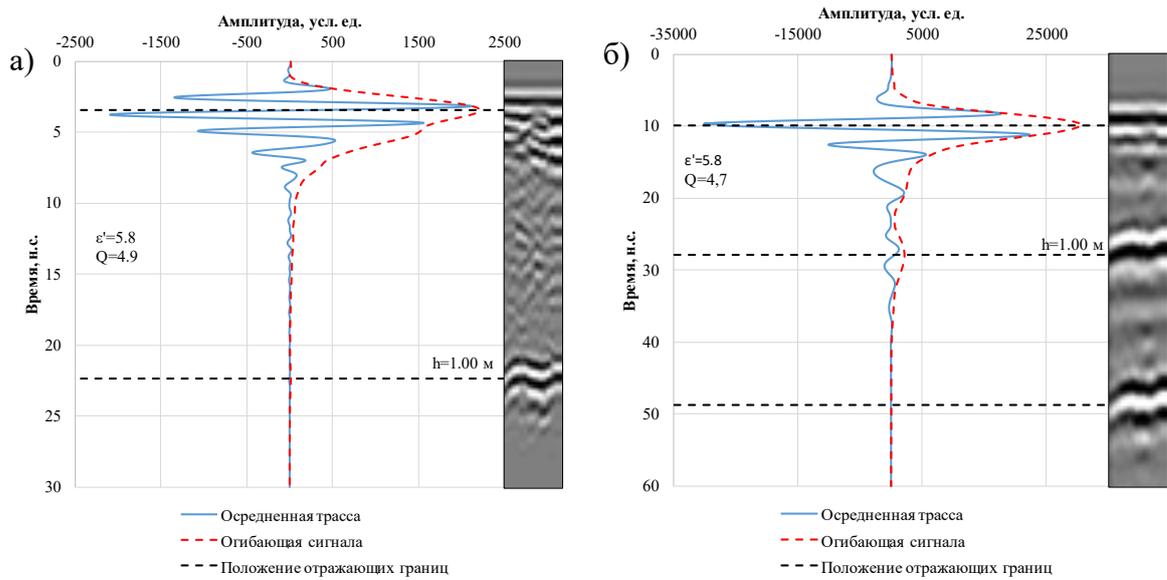


Рисунок 4.42 – Осреднённые трассы для определения параметра добротности: (а) по данным 1000 МГц; (б) по данным 500 МГц

Для определения добротности слоя непрерывно вдоль профиля исследования был использован следующий подход. В скользящих окнах высотой от 0 до 5 нс и от 15 до 20 нс и шириной 20 трасс по всей длине профиля рассчитывались максимальные значения амплитуд прямой и отраженной волны (рисунок 4.43). Амплитуда прямой волны достаточно выдержана на протяжении всего профиля и лежит в пределах от 2000 до 2500 ед. Амплитуда отраженной волны менее выдержана и колеблется в пределах от 25 до 80 ед.

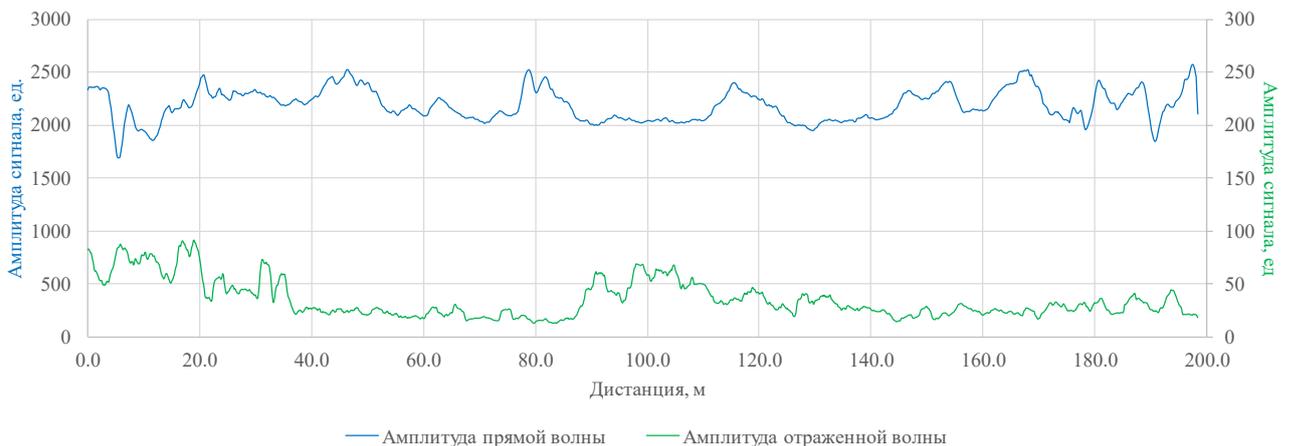


Рисунок 4.43 – Графики максимальных амплитуд прямой и отраженной волны

На основании полученных амплитуд прямой и отраженной волны с использованием соотношения (1) рассчитывалась добротность грунтов верхнего слоя непрерывно вдоль всего профиля (рисунок 4.44).

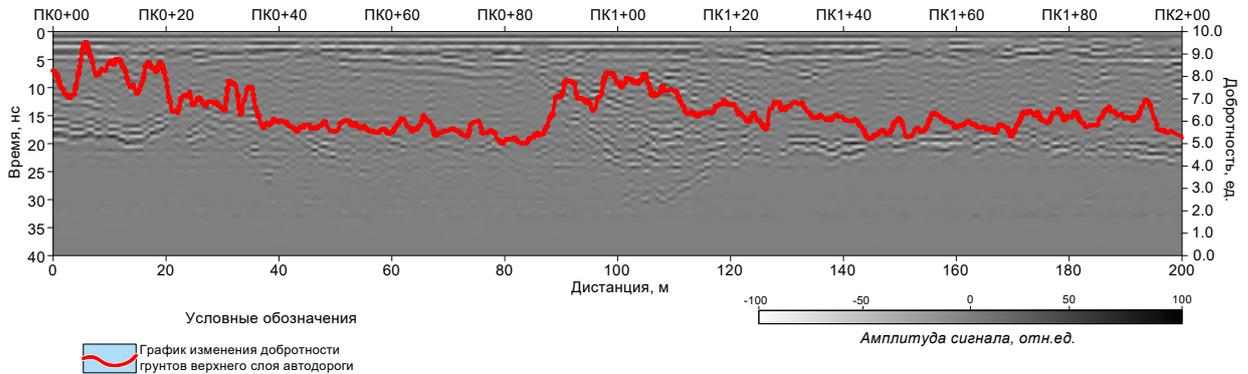


Рисунок 4.44 – Временной георадиолокационный разрез на частоте 1000 МГц с наложенным графиком изменения добротности грунтов верхнего слоя автодороги

Анализ графика изменения добротности показывает, что полученные значения отражают визуально наблюдаемые на радарограмме изменения яркости оси синфазности (высокие значения добротности соответствуют яркой границе, низкие значения - тусклой). Значения добротности, полученные в непрерывном режиме, хорошо соответствуют ее точечным определениям на ПК1+50 (рисунок 4.42).

Результаты ЭТ

На рисунке 4.45 приведена электротомографическая модель с наложенным графиком изменения значений УЭС, осредненных для грунтов верхнего интервала автодороги до глубины 1 м. Электротомографическая модель достаточно контрастна, что позволяет выделить верхний высокоомный и нижний низкоомный слой. На интервале между ПК0+60-ПК1+00 наблюдается понижение границы высокоомного слоя, что связано с земляными работами по укладке бетонного коллектора. В нижнем слое электротомографической модели наблюдаются локальные низкоомные аномалии. График изменения УЭС верхнего слоя осложнен как локальными максимумами, так и локальными минимумами, характеризующими отдельные неоднородности в верхнем слое автодороги.

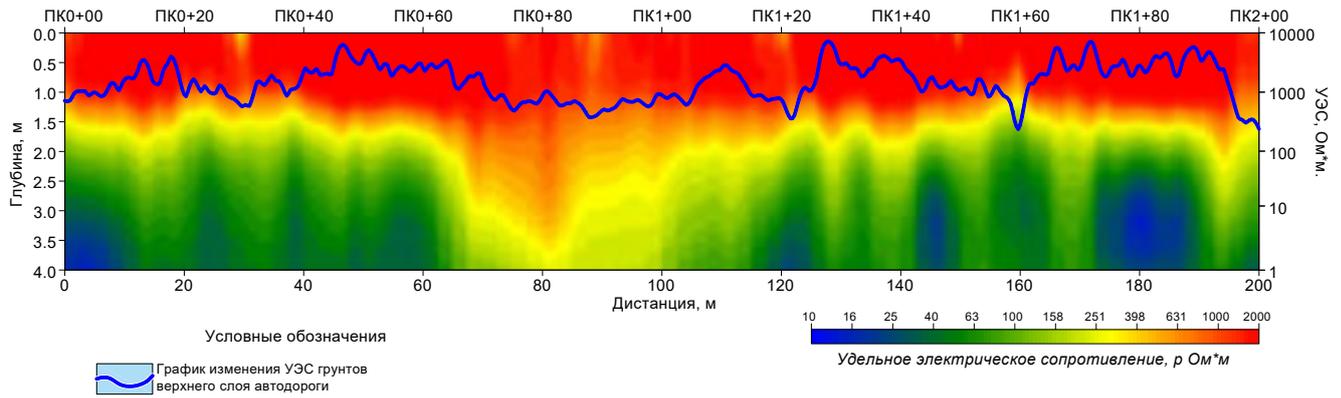


Рисунок 4.45 – Электротомографическая модель с наложенным графиком изменения УЭС грунтов верхнего слоя автодороги

На рисунке 4.46 приведена совмещенная георадиолокационно-электротомографическая модель. Данные георадиолокации и электротомографии хорошо пространственно согласуются между собой.

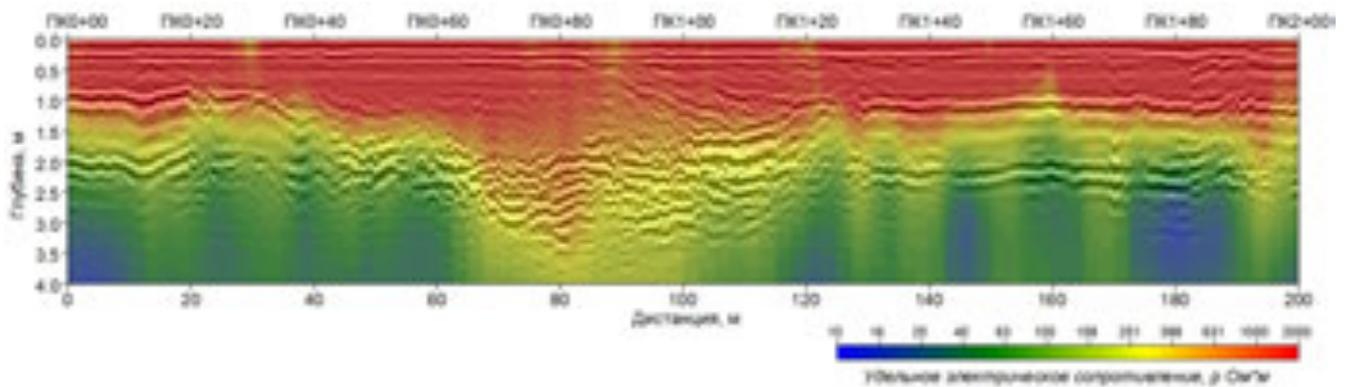


Рисунок 4.46 – Совмещенная георадиолокационно-электротомографическая модель

Анализ результатов

На рисунке 4.47 приведена результирующая совместная георадиолокационно-электротомографическая интерпретационная модель автодороги. Данные электротомографии и георадиолокации согласованы между собой и не имеют противоречий. Метод георадиолокации характеризуется высокой разрешающей способностью верхней части разреза, метод электротомографии, в свою очередь, обладает возможностью исследовать разрез на достаточно большую глубину. Низкие значения УЭС в нижней части электротомографической модели являются причиной быстрого затухания электромагнитной волны, что ограничивает глубину исследования метода георадиолокации. По данным георадиолокационного зондирования определена диэлектрическая проницаемость и тем самым однозначно восстановлена геометрия разреза без привлечения дополнительной априорной информации.

На модели видно, что оба метода являются достаточно чувствительными к нарушениям структуры земляного полотна автодороги, которые в данном примере связаны с прокладкой инженерных коммуникаций. Между тем, несмотря на достаточно большие размеры бетонного коллектора, установить его наличие в теле автодороги без какой-либо дополнительной информации по данным геофизики возможно только по косвенным признакам.

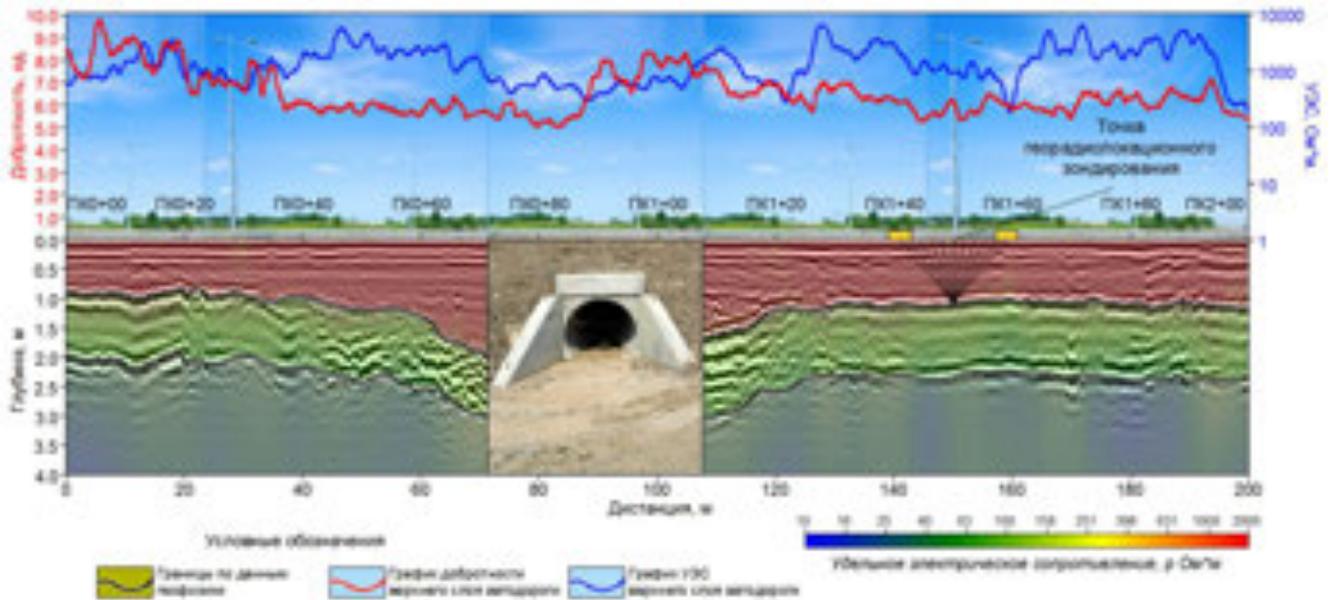


Рисунок 4.47 – Совместная георадиолокационно-электротомографическая интерпретационная модель

Значения добротности и УЭС количественно характеризуют качество строительного материала и состояние элементов земляного полотна автодороги. Высокие значения добротности и УЭС указывают на высокое качество, низкие значения – на низкое. Причин для изменения УЭС и добротности достаточно много, но одной из основных является изменение содержания глинистой фракции (Wunderlich T., Rabbel W., 2013), которая, в свою очередь, контролирует значение коэффициента фильтрации (Shevnin V. et al, 2006) и, как следствие, такой важный параметр, как влажность. На основе геофизических данных появляется возможность эффективно распределить инженерно-геологические выработки, расположив их только в местах явно выраженных геофизических аномалий. В случае наличия заверочных скважин и лабораторных измерений инженерно-геологических параметров возможно построение корреляционных зависимостей между геофизическими и инженерно-геологическими данными и распространение последних на всю протяженность исследуемого разреза.

Анализ полученной в результате геофизических исследований совместной георадиолокационно-электротомографической модели с элементами ее количественной

интерпретации указывает на достаточно выдержанную геометрию разреза и однородность электрофизических параметров, косвенно характеризующих общее состояние автодороги и качество строительных материалов, из которых она выполнена.

4.3.4 Выводы по разделу

Комплекс электроразведочных методов, включающий бесконтактную электротомографию и георадиолокацию, является оптимальным для геофизического изучения состояния автодорог при отсутствии возможности гальванических заземлений в условиях асфальтового покрытия. Комплексное использование методов электроразведки позволяет построить согласованную георадиолокационно-электротомографическую интерпретационную модель автодороги, отражающую особенности, как ее геометрического строения, так и количественно охарактеризовать изменение ее состояния на основе электрофизических параметров, таких как добротность и УЭС. Задача перехода от временного масштаба георадиолокационного разреза к глубинному успешно решается с использованием значений диэлектрической проницаемости конструктивных слоев дорожной одежды, полученной на основе георадиолокационного зондирования без привлечения дополнительной априорной информации.

4.4 Исследование фильтрационных свойств дренирующих слоев дорожной одежды

4.4.1 Объект исследований

Изучение фильтрационных свойств песков по данным комплексного применения методов георадиолокации и электротомографии выполнено на интервале автомобильной дороги сразу после завершения её строительства (рисунок 4.48).



Рисунок 4.48 – Панорама участка исследований

Структура и геометрические параметры конструктивных слоев дорожной одежды на обследованном участке, в соответствии с проектной и исполнительной документацией, представлены в следующем виде (рисунок 4.49):

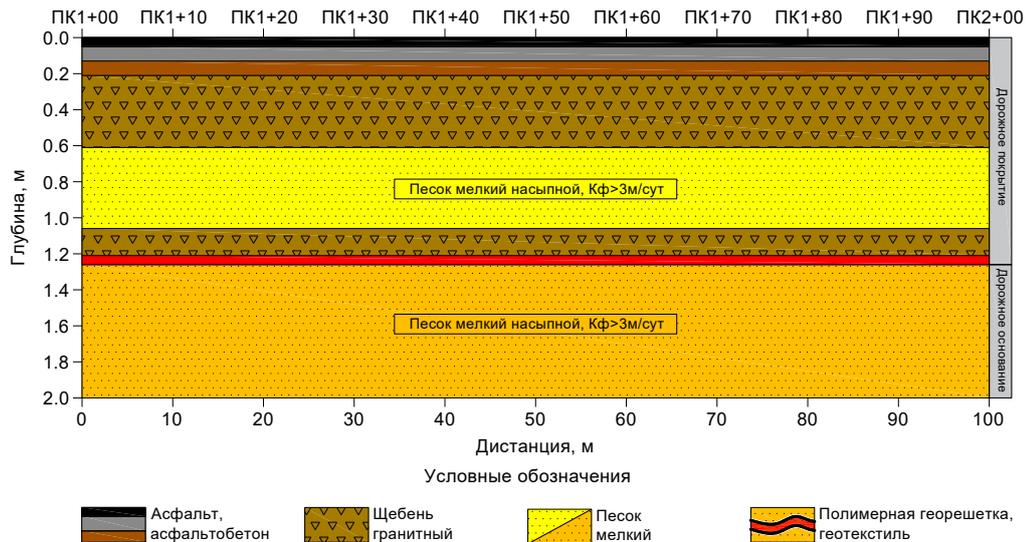


Рисунок 4.49 – Строение дорожного покрытия

1. Асфальтобетон $h_1=0.21$ м
2. Щебеночный слой $h_2=0.40$ м
3. Дренирующий слой песка мелкозернистого $h_3=0.45$ м
4. Щебеночный слой $h_4=0.15$ м
5. Геотекстиль и георешетка $h_5=0.05$ м

Нижняя часть земляного полотна, расположенная под геотекстилем, отсыпана песком мелким, который подстилают глинистые грунты естественного происхождения. На обследованном интервале дороги в основании земляного полотна была обнаружена линза торфяных отложений. По данным исполнительной документации слой торфа был удален лишь частично, что привело к просадке грунтов земляного полотна в процессе строительства.

4.4.2 Методика исследований

Геофизические съемки методами георадиолокации (ГРЛ) и электротомографии (ЭТ) выполнены по профилю, проложенному по асфальтобетонному покрытию. Центральная часть профиля была совмещена с интервалом просадки земляного полотна.

Георадиолокационное профилирование выполнено с аппаратурой Zond-12e (производство НПФ "Радарные системы", г. Рига). Для изучения разреза дорожной одежды проводилась двухчастотная съемка на центральных частотах зондирующих импульсов 500 и 1000 МГц. Использование двух частот обеспечило зондирование разреза на разные глубины с различным пространственным разрешением. Съемка выполнялась по стандартной методике георадиолокационного профилирования.

Электротомографические исследования выполнены с аппаратурой БИКС (производство ОАО "СКБ сейсмического приборостроения", г. Саратов) в режиме многоразного профилирования с бесконтактной дипольной осевой установкой на частоте 16.5 кГц (рисунок 4.50). Размеры измерительного и питающего емкостных диполей составляли 1.25 м.

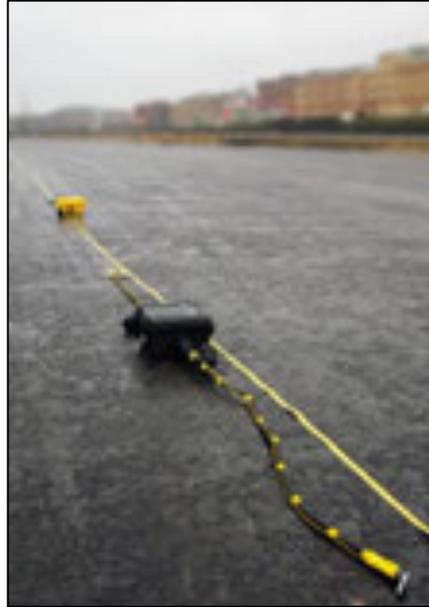


Рисунок 4.50 – Бесконтактный измеритель кажущихся сопротивлений (БИКС) в процессе съемки

Расстояния между центрами диполей составляли: 1.25; 2.5; 3.75; 5; 10; 15 м.

4.4.3 Результаты исследований

На георадарограмме, полученной с антенной 1000 МГц, отчетливо проявились яркие и протяженные оси синфазности, контролирующие границы между слоями дорожной одежды, представленными асфальтобетоном, гравием, песком, полимерной георешеткой и геотекстилем (рисунок 4.49). Согласно исполнительной документации поверхность георешетки и геотекстиля, расположена горизонтально, и располагается на постоянной глубине. Однако на георадарограмме ось синфазности, соответствующая волне, отраженной от этой поверхности, ступенчато погружается в районе ПК1+60. Динамические атрибуты волнового поля позволяют связать это искривление оси синфазности с изменением скорости распространения электромагнитных импульсов в дренажном слое. Скорость в первом интервале от 0 до 50 м больше, чем во втором – от 50 до 100 м, что может быть связано с увеличением влажности песка в пределах второго интервала. На это указывает изменение длины волны, структуры и интенсивности волнового электромагнитного поля (рисунок 4.51).

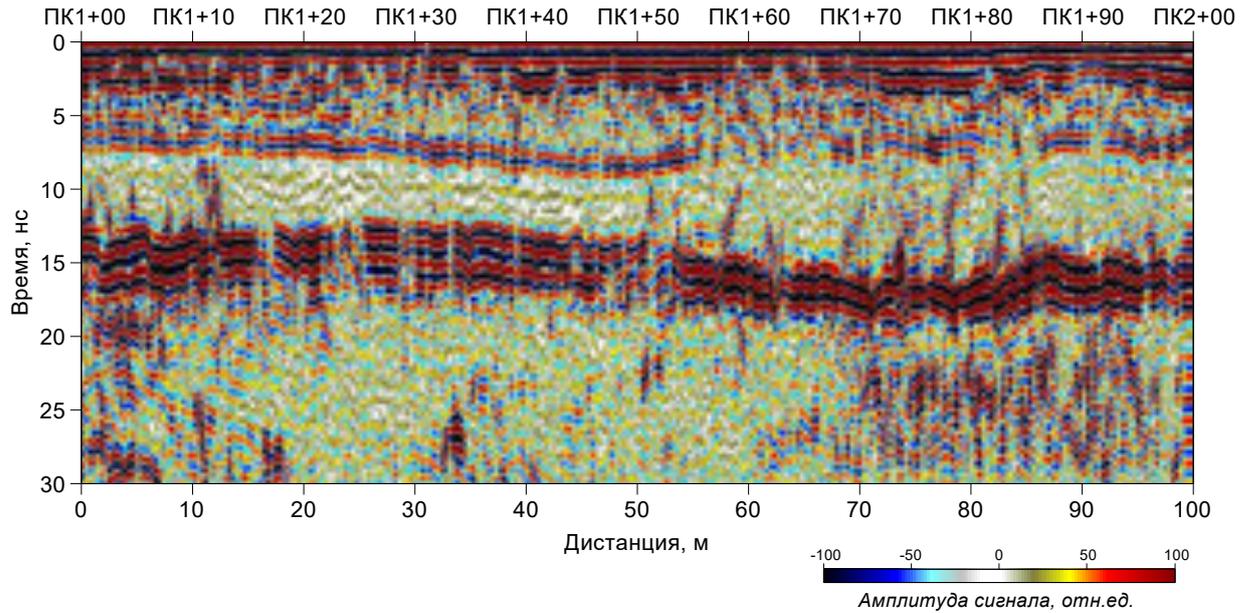


Рисунок 4.51 – Временной георадиолокационный разрез на частоте 1000 МГц

Первый вариант интерпретации подразумевает послойную интерпретацию, когда каждому выделенному слою задается определённое значение диэлектрической проницаемости, на основе которого происходит переход из временного вертикального масштаба в глубинный. Пример такой интерпретации приведен на рисунке 4.52.

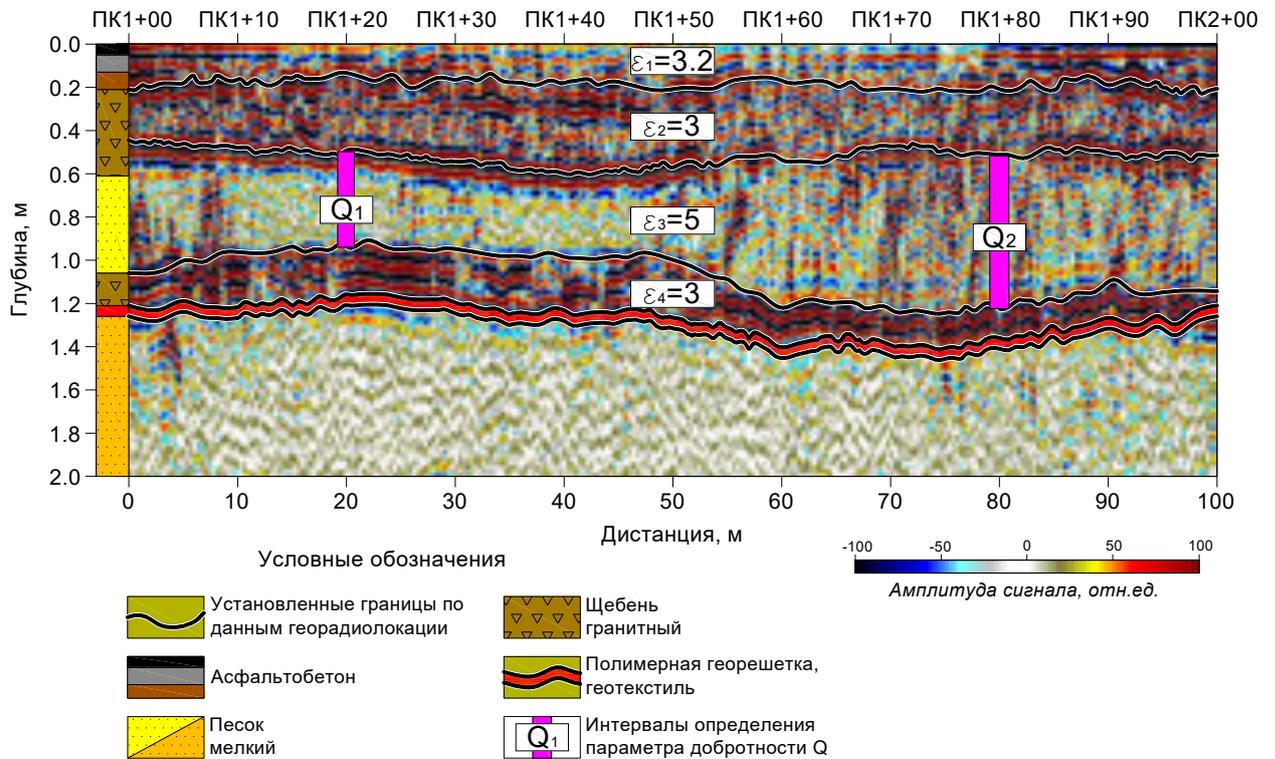


Рисунок 4.52 – Строение верхней части дорожной одежды по данным георадиолокации (послойная интерпретация)

Из рисунка 4.52 видно, что на радарограмме можно выделить два характерных интервала. На первом интервале ПК 1+00-ПК1+50 слой дренирующей песчаной подушки сжимается. На интервале ПК 1+50-ПК2+00 данный слой, напротив, расширяется и создается впечатление, что в районе ПК 1+70-ПК 1+80 происходит просадка основания дорожной одежды.

Между тем, все этапы строительства данного участка автодороги были подробно отражены в исполнительной документации, из которой следовало, что геометрия слоев дорожной одежды строго отвечает проектной документации. Кроме того, георадиолокационные исследования проводились сразу после завершения строительства, и за такой короткий период просадка основания дорожной одежды могла произойти с низкой вероятностью.

На основании данной информации был выполнен второй вариант интерпретации. Послойно-интервальная интерпретация заключалась в том, что значение диэлектрической проницаемости задавалось каждому интервалу выделенного слоя так, чтобы переход из временного вертикального масштаба в глубинный сохранил геометрию дорожной одежды без деформаций ее основания. Послойно-интервальная интерпретация приведена на рисунке 4.53.

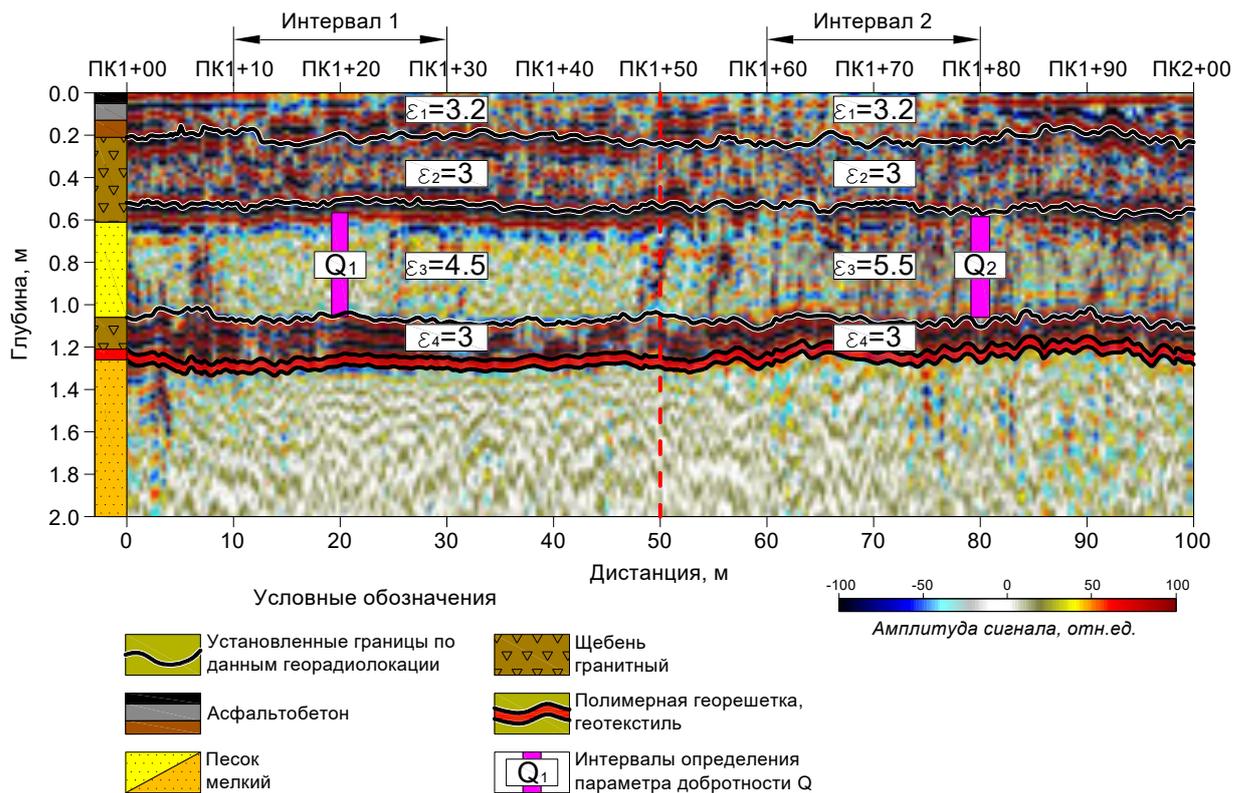


Рисунок 4.53 – Строение верхней части дорожной одежды по данным георадиолокации (послойно-интервальная интерпретация)

Между тем, несмотря на исполнительную документацию, указывающую на отсутствие каких-либо просадок в основании дорожной одежды, первый рассмотренный вариант интерпретации нами не исключался.

На основе многозарядного бесконтактного электропрофилирования рассчитана электротомографическая модель, представленная на рисунке 4.54. Модель хорошо отражает строение основных слоев дорожной одежды и ее основания. Дорожная одежда характеризуется высокими значениями УЭС, земляное полотно – средними значениями УЭС, естественные грунты основания – низкими значениями УЭС. Недостатком модели является гладкое распределение УЭС, которое не дает возможности однозначно провести геоэлектрические интерпретационные границы, а позволяет только предположить их пространственное расположение.

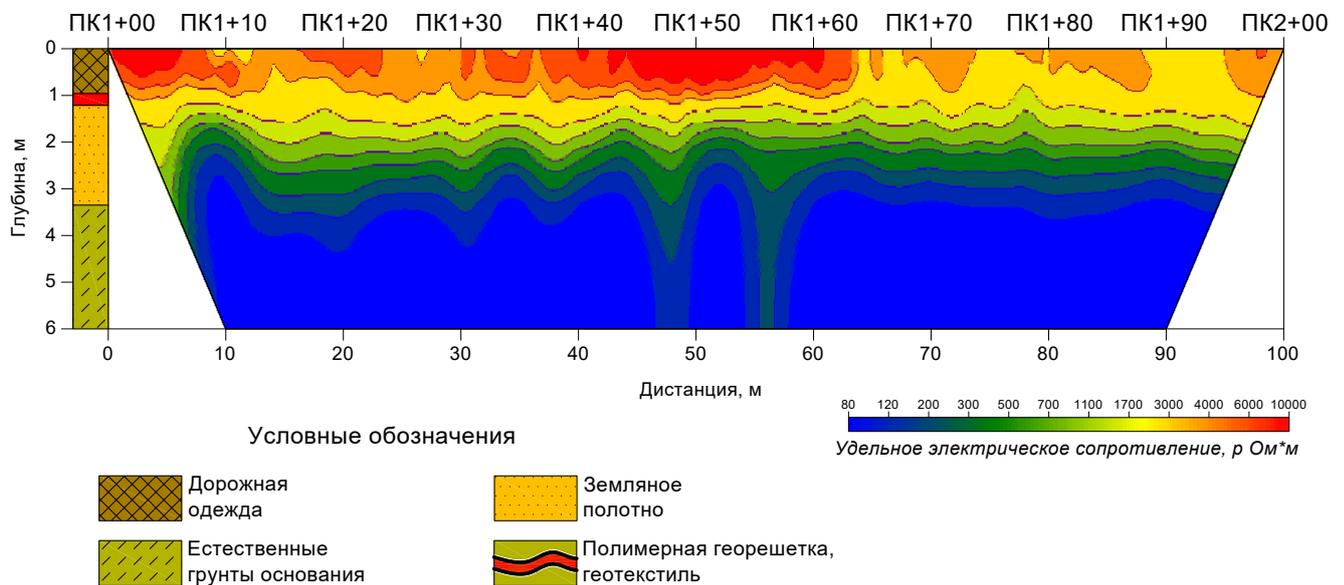


Рисунок 4.54 – Модель распределения УЭС по результатам 2D инверсии

Интегральные значения УЭС для выделенных слоев автодороги получены в режиме 1D инверсии с закрепленными границами, установленными по данным георадиолокации – рисунок 4.55.

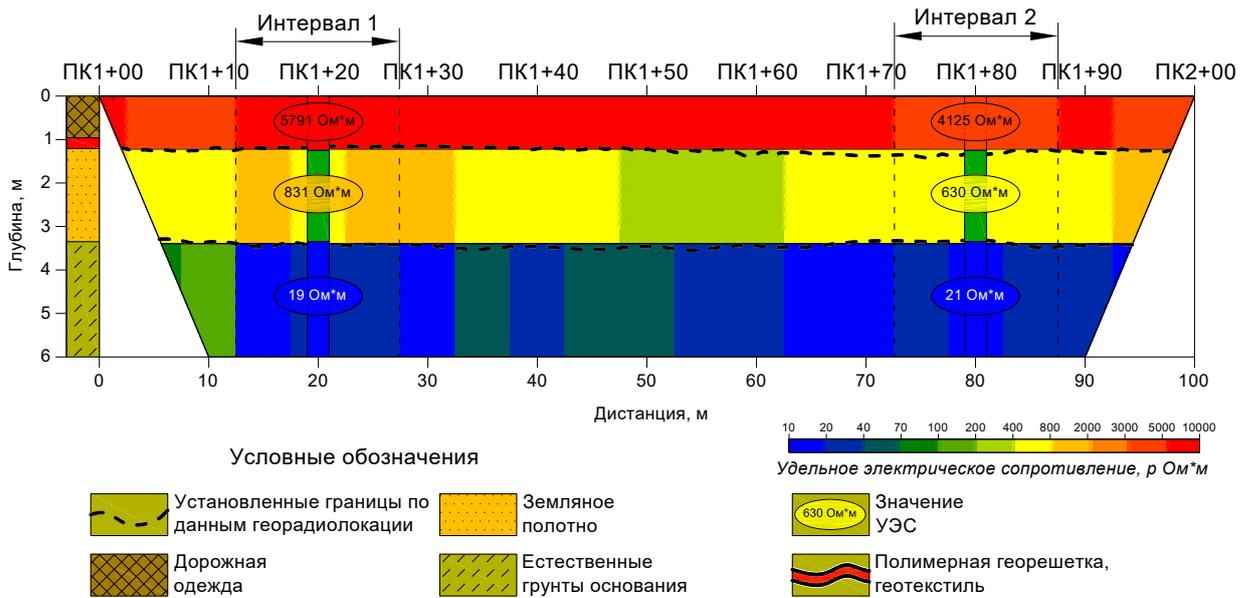


Рисунок 4.55 – Модель распределения УЭС по результатам 1D инверсии с закрепленными георадиолокационными границами и интервальной интерпретацией УЭС

Значения УЭС по каждому из рассматриваемых интервалов получены на основе осреднения трех соседних наблюдаемых кривых дипольных электрических зонирований (ДЭЗ). Осредненные трехслойные кривые ДЭЗ типа Q и соответствующие им модели УЭС приведены на рисунке 4.56.

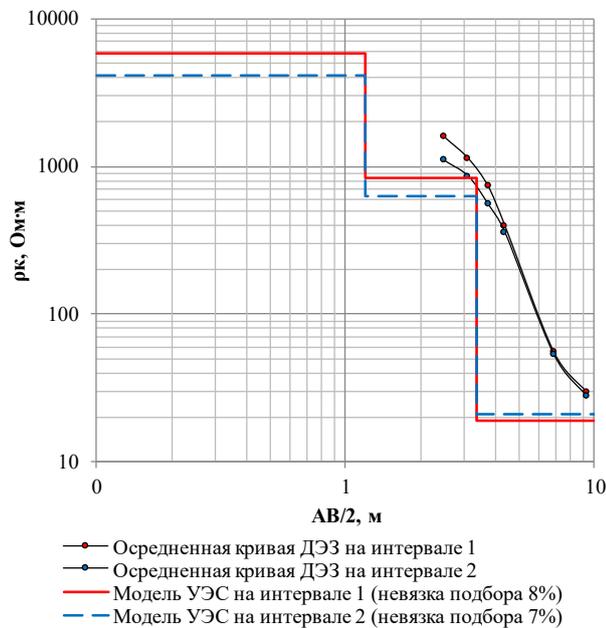


Рисунок 4.56 – Осредненные кривые ДЭЗ и полученные на их основе модели УЭС для первого и второго интервалов

Для определения параметра добротности Q выбраны два интервала слоя песка в районе ПК1+20 и ПК1+80, которые, как видно на радарограмме, существенно отличаются между собой по волновой картине. По каждому из интервалов была получена осредненная трасса (рисунок 4.57 а и б), на основе которой и производились дальнейшие расчеты электрофизических и петрофизических параметров в рамках послойного и послойно-интервального вариантов интерпретации. Результаты расчетов представлены в таблице 4.3.

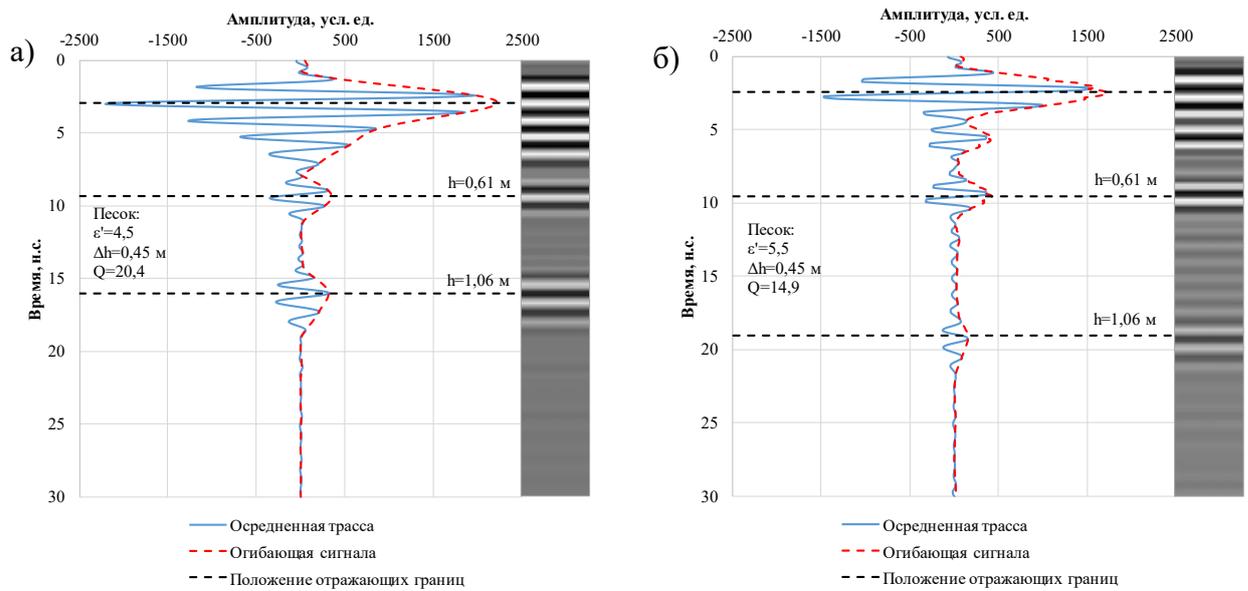


Рисунок 4.57 – Осредненные трассы с параметрами расчетов для послойно-интервальной интерпретации: (а) интервал 1; (б) интервал 2

Таблица 4.3 – Измеренные электрофизические и рассчитанные на их основе петрофизические параметры слоя дренирующей песчаной подушки для двух интервалов в разных вариантах интерпретации

<i>Интервал</i>	<i>Параметр</i>	<i>Послойная интерпретация</i>	<i>Послойно-интервальная интерпретация</i>
1	ε' , ед.	5	4,5
	ρ , Ом·м	5791	5791
	Q , ед.	20.7	20.4
	Kf , м/сут.	8.9	4.4

<i>Интервал</i>	<i>Параметр</i>	<i>Послойная интерпретация</i>	<i>Послойно-интервальная интерпретация</i>
2	ϵ' , ед.	5	5,5
	ρ , Ом·м	4125	4125
	Q, ед.	15.7	14.9
	Kf, м/сут.	1.2	1.4

Расчет электрофизических параметров и полученные на их основе петрофизические характеристики для песка дорожного покрытия показал, что первый интервал в районе ПК1+20 характеризуется высокими значениями УЭС и добротности, что отражается на полученном в результате расчетов незначительном содержании глинистых частиц и как следствие, высоким коэффициентом фильтрации от 4.4 до 8.9 м/сут для интервала. Вторым интервалом в районе ПК1+80 характеризуется меньшими значениями УЭС и добротности относительно первого интервала, что находит отражение в увеличении содержания глинистых частиц и значительно меньших коэффициентах фильтрации от 1.2 до 1.4 м/сут.

Лабораторные анализы коэффициента фильтрации дренирующей песчаной подушки, взятого из борки автодороги, показали значения $Kf=3.5$ м/сут. Данное значение существенно отличается от значений Kf , рассчитанных по данным георадиолокации и электротомографии. Причем более близкими к лабораторному значению Kf оказываются значения, полученные в рамках послойно-интервальной интерпретации радарограмм, что указывает на лучшее соответствие данной интерпретации как заявленной геометрии дорожной одежды, так и ее петрофизическим свойствам. Стоит отметить, что исследованные интервалы существенно отличаются по своим электрофизическим и петрофизическим свойствам. Полученные на основе геофизических исследований данные позволяют охарактеризовать слой дренирующей песчаной подушки на втором интервале в районе ПК1+80 как более влажный (пониженные значения УЭС; повышенные значения ϵ') и менее водопроницаемый (повышенная глинистость S ; пониженный коэффициент фильтрации Kf) относительно первого интервала. Кроме того, если взять за основу первый вариант послойной интерпретации радарограммы, на данном интервале возможна просадка основания дорожной одежды.

Несмотря на то, что получены численные значения коэффициента фильтрации и глинистости для слоя песка, нужно учитывать эмпирический характер зависимостей, на основе которых они были рассчитаны, и относиться к ним не как к количественному определению данных параметров, а как к их относительной качественной оценке.

На рисунке 4.58 представлена георадарограмма, полученная с антенной 500 МГц, обеспечивающей глубину исследования до 6 м. Граница между земляным полотном и дорожным основанием на радарограмме выделяется условно по изменению георадиолокационной волновой картины, связанной с затуханием электромагнитной волны в грунтах земляного полотна. Данная граница, выделяемая по динамическим характеристикам георадиолокационной записи в нижней части разреза, выдержана слабо и имеет существенные колебания в вертикальной плоскости, что с трудом отвечает известной геометрии строения дорожного основания и земляного полотна.

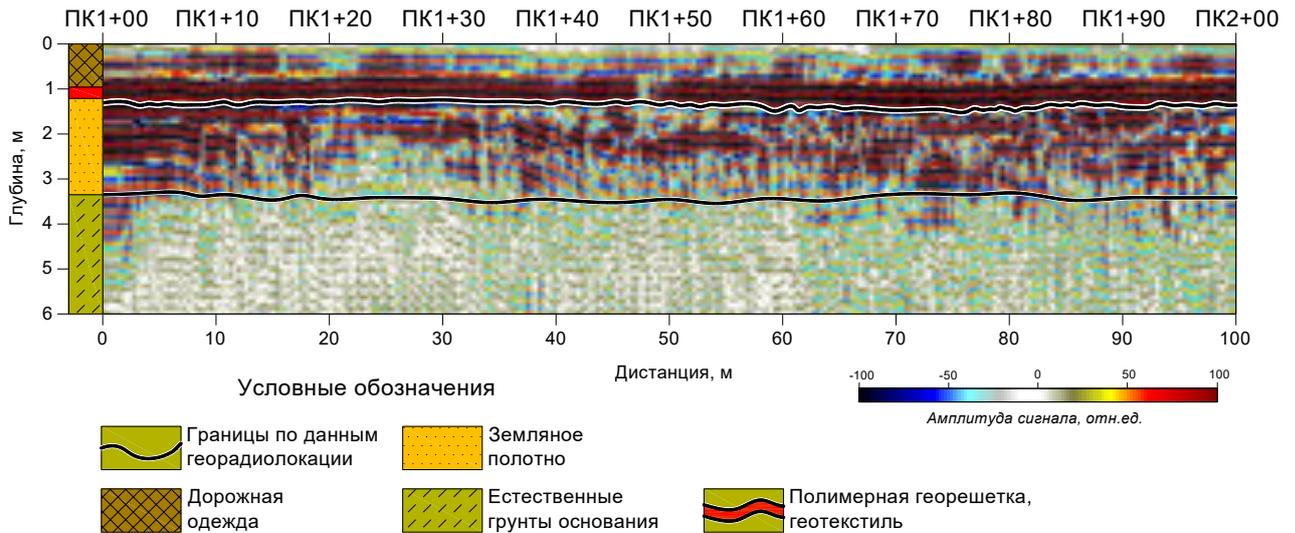


Рисунок 4.58 – Строение дорожного покрытия, дорожного основания и земляного полотна по данным георадиолокации (АБ-500 МГц)

Отсутствие кинематической границы, характеризующей переход между дорожным основанием и земляным полотном, не позволяет определить добротность слоя песка дорожного основания методом амплитудного спада. В связи с этим на основе радарограммы, полученной с антенной 500 МГц, рассчитан параметр мгновенной добротности Q (Barnes A.E., 1992) с использованием сейсмического пакета Kingdom. Данный параметр традиционно используется в атрибутивном анализе сейсморазведки как индикатор углеводородов, напрямую связанный с пористостью, характеризующей способность вещества поглощать сейсмическую энергию. В методе георадиолокации параметр добротности, по аналогии с сейсморазведкой, также дает возможность количественно оценить затухание электромагнитной волны, которое, в первую очередь, обусловлено глинистостью поглощающих грунтов.

На рисунке 4.59 представлена георадиолокационная модель мгновенной добротности Q . Дорожное покрытие характеризуется высокими значениями добротности Q до 50 единиц. Значения Q для дорожного основания лежат в пределах от 10 до 20 единиц. В свою очередь,

грунты земляного полотна характеризуются низкими значениями Q до 10 единиц, что является прямым признаком повышенного содержания глинистых частиц, обуславливающих высокую степень затухания электромагнитной волны. Порядок значений добротности для песка в слое дорожного покрытия от 15 до 20 ед., полученных на основе расчета методом амплитудного спада, согласуется со значениями, полученными на основе автоматического расчета мгновенной добротности.

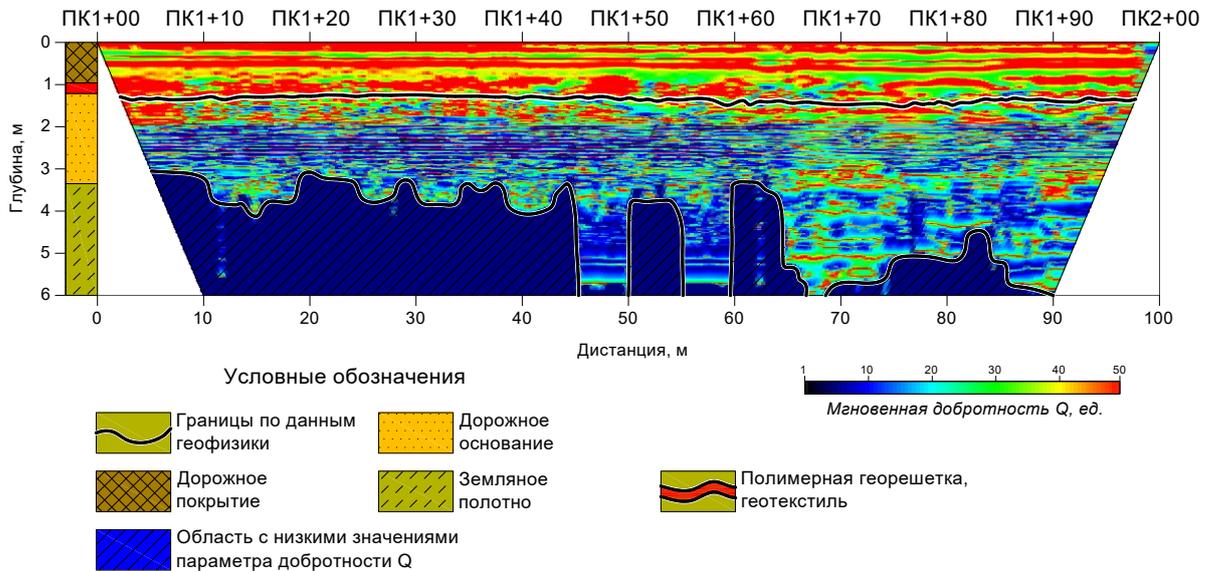


Рисунок 4.59 – Георадиолокационная модель мгновенной добротности Q

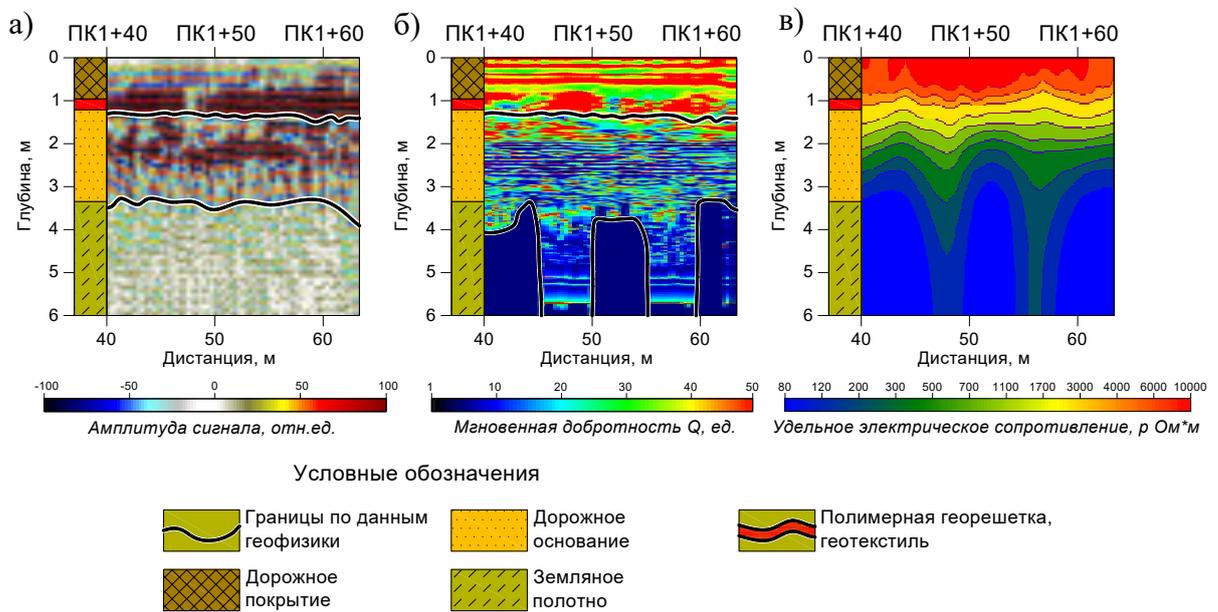


Рисунок 4.60 – Корреляция вертикальных аномалий в центральной части профиля по данным георадиолокации и электротомографии. Фрагменты: (а) радарограммы; (б) модели мгновенной добротности Q ; (в) электротомографической модели

Интересной особенностью георадиолокационной модели мгновенной добротности Q является корреляция вертикальных аномалий в районе ПК1+40-ПК1+60 с аномалиями УЭС на том же интервале (рисунок 4.60). Примечательно то, что на обычной радарограмме данные аномалии не отражены, что лишним раз подчеркивает эффективность представления результатов георадиолокационных исследований в виде модели мгновенной добротности Q , подчеркивающей дополнительные особенности исследуемого разреза.

Природа вертикальных аномалий, нашедших отражение на георадиолокационных и электротомографических разрезах, не установлена и требует дополнительных исследований. Между тем, данные аномалии независимо подтверждаются различными методами, что указывает на их достоверность.

4.4.4 Выводы по разделу

Рассмотрен альтернативный подход к оценке коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе комплекса методов сопротивления и георадиолокации. Определение содержания глинистых частиц, которое контролируется петрофизической взаимосвязью между мнимой и действительной частями диэлектрической проницаемости и удельным электрическим сопротивлением, связанными через параметр добротности и полученными на основе методов сопротивления и георадиолокации, позволяет оценивать коэффициент фильтрации песчано-глинистых грунтов. Несомненным преимуществом данного подхода над уже существующим является высокая разрешающая способность данных метода георадиолокации, позволяющая оценивать петрофизические параметры достаточно тонких грунтовых прослоев. Недостатком является ограниченность применения, которая заключается в необходимости наличия на радарограммах ярких отражающих георадиолокационных границ и хорошо выдержанной прямой волны, что возможно только в случае работы в условиях идеального соприкосновения антенны с исследуемой поверхностью.

Практический пример использования методов георадиолокации и бесконтактной электротомографии показал эффективность данного комплекса в условиях работы на асфальтовом покрытии. Георадиолокационные исследования, выполненные по стандартной методике с антеннами 500 и 1000 МГц, позволили с высокой степенью детальности охарактеризовать строение, как дорожного покрытия, так и грунтов основания. Электротомографические исследования, выполненные с бесконтактной индукционной электроразведочной аппаратурой, использование которой на асфальтовом покрытии автодорог не является традиционным, также показали свою эффективность. Электротомографическая модель высокого разрешения отразила все основные элементы строения дорожной одежды и

земляного полотна автодороги. Полученные независимыми геофизическими методами данные характеризуют количество слоев дорожного покрытия и их геометрические соотношения и хорошо согласуются между собой и с данными, представленными в проектной документации. Также на основе экспресс-оценки удалось установить изменение коэффициента фильтрации слоя песка дорожного покрытия и дать его относительные количественные характеристики для разных участков автодороги.

Таким образом, рассмотренный комплекс методов георадиолокации и бесконтактной электротомографии может быть рекомендован для решения задач авторского надзора и контроля качества автодорожного строительства (Глазунов В.В., Лаломов Д.А., 2016).

4.5 Обоснование экономической эффективности геофизического комплекса

Выбор любого геофизического комплекса должен быть обоснован не только с технической, но и с экономической точки зрения (Лаломов Д.А., Коваленко Г.В., 2013). В данном разделе пойдет речь об обосновании экономической эффективности комплекса ЭТ и ГРЛ на основе риск-подхода. В качестве примера будут рассмотрены объекты бестраншейной прокладки коммуникаций под действующими железными дорогами (Лаломов Д.А. и др., 2013).

Управление рисками строительных проектов является актуальным и перспективным направлением повышения экономической эффективности производства, как инженерных изысканий, так и строительства в целом (Lalomov D.A., Kovalenko G.V., 2014). Как считают специалисты, в условиях постоянно возрастающей конкуренции экономика инженерных изысканий – это не просто составление смет на те или иные виды работ, а ясное понимание того, каким образом изыскания и строительство взаимосвязаны экономически, к каким перерасходам в строительстве может приводить (и часто приводит) не оптимальное выполнение изыскательских работ (Богданов М.И. и Черняк Э.Р., 2008). Важную роль в данной экономической взаимосвязи могут играть геофизические исследования, которые являются самостоятельным видом работ при инженерно-геологических изысканиях и выполняются на всех стадиях проектирования (СП 11-105-97, 2004).

Учитывая стратегические цели ОАО «РЖД», заключающиеся в инновационном развитии железнодорожной отрасли, достижении параметров ее экономической эффективности, экологической и функциональной безопасности (Программа инновационного ..., 2011), представляется целесообразным применение современных технологических решений на всех этапах, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией железных дорог. Одно из таких решений – использование бестраншейной прокладки (БПК) инженерных коммуникаций под железнодорожным полотном. Несмотря на ряд преимуществ (Белецкий Б.Ф., 2004), следует

отметить, что производство БПК осложнено различными факторами, обусловленными недостаточным количеством информации об инженерно-геологическом строении участка, которые могут привести к реализации строительных рисков. Реализация рисков влечет за собой финансовые и временные потери, которые, в свою очередь, приведут к снижению эффективности строительных работ. С учетом современных требований к управлению рисками (ГОСТ Р ИСО 31000, 2012) повышение эффективности проектов БПК может быть реализовано на основе применения инженерно-геофизических методов. Оценка экономической эффективности и преимуществ от использования таких исследований может быть определена на основе риск-подхода – количественного анализа риска (Лаломов Д.А. и Коваленко Г.В., 2013).

Актуальность рассматриваемого в данном разделе вопроса обусловлена тем, что в условиях существующей российской нормативной базы неочевидность границ экономической эффективности геофизических методов исследования служит одной из причин недостаточного распространения последних в сравнении с лучшими мировыми практиками. В качестве ответа на поставленный вопрос предлагается определение этих границ на основе риск-подхода. Практическая значимость заключается в расчете количественных критериев для принятия решения инвестором (подрядчиком) о применении методов геофизических исследований при реализации проектов БПК.

4.5.1 Объект исследований

В нашей стране на сегодняшний день реализуется ряд крупных железнодорожных проектов, в связи с чем БПК под железной дорогой становится все более востребованным и перспективным видом строительства. Востребованность БПК под железной дорогой, помимо технологических преимуществ, обусловлена нормативными требованиями, установленными ОАО "РЖД" (Инструкция о порядке ..., 2012), которые запрещают прокладку коммуникаций открытым способом на всех участках железнодорожного пути, где уложены защитные или разделительные слои, распространенные в настоящее время практически повсеместно.

Существуют различные способы БПК – проходка щитами различного диаметра, способ продавливания стальных футляров, бурошнековое бурение, горизонтально-направленное бурение, способ направленного прокола, микротоннелирование. Ввиду того, что каждый из вышеперечисленных способов прокладки коммуникаций обладает своей спецификой, выбор конкретной технологии напрямую зависит от инженерно-геологических условий участка строительства (Инструкция о порядке ..., 2012; Белецкий Б.Ф., 2004).

С увеличением объемов работ по замене старых и прокладке новых коммуникаций бестраншейными методами строители все чаще сталкиваются с проблемами проходки в районах

со сложным инженерно-геологическим строением. В строительной практике риски, связанные с состоянием инженерно-геологической среды, называются грунтовыми рисками (Рыбаков А.П., 2005). Результатом их проявления является срыв сроков работ, необходимость изменения проекта с выбором нового места пересечения, поломка дорогостоящего оборудования. Иными словами, происходит реализация рисков, обусловленных влиянием неопределенности на достижение поставленных целей (ГОСТ Р 51897, 2012), где неопределенностью является состояние инженерно-геологической среды, а целью – эффективное создание объекта транспортной инфраструктуры.

Особо остро данная проблема проявляется на объектах строительства и реконструкции транспортной инфраструктуры в районах, где в верхней части разреза преобладают скальные грунты, валунный и грубообломочный материал (Савин В.А. и др., 2012). В настоящий момент производители научились делать оборудование, обеспечивающее БПК в грунтах практически любой категории трудности разработки (Добронравов С.С. и Дронов В.Г., 2001). Однако производство работ в скальных грунтах связано с повышенной сложностью и, как следствие, с большей стоимостью, нежели производство работ в песчаных или глинистых грунтах. Кроме того, процессу прокладки коммуникаций может препятствовать наличие в разрезе, например, старого трубопровода или какого-либо другого препятствия, некорректно вынесенного на кадастровый план участка строительства (Lance J.D., 2008). На рисунке 4.61 изображены основные стадии производства БПК и возможные варианты реализации инженерно-геологических рисков.

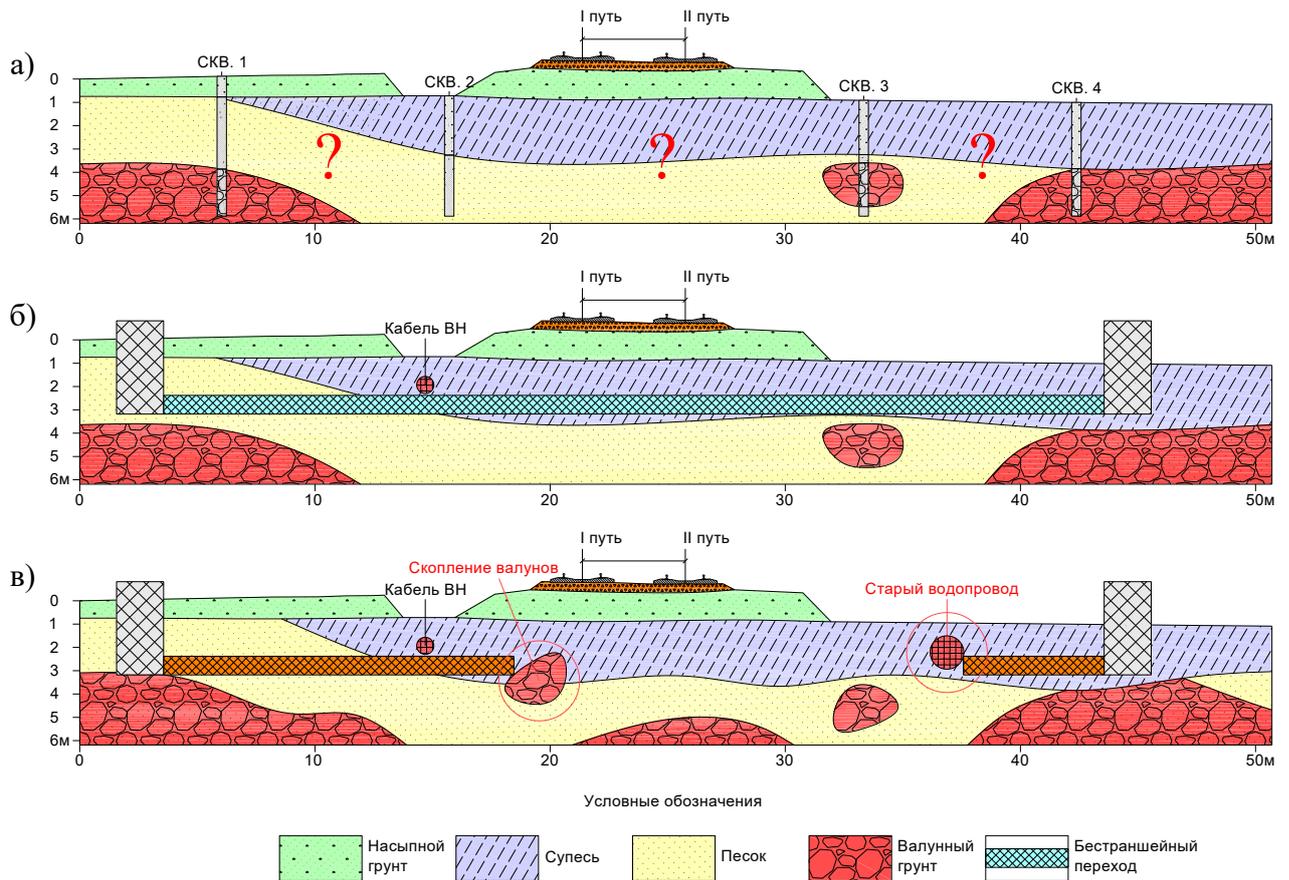


Рисунок 4.61 – Стадии проекта БПК: (а) инженерно-геологические изыскания; (б) проектирование; (в) реализация инженерно-геологических рисков в процессе строительства

Пример

Для наглядности проиллюстрируем реализацию риска, связанного с инженерно-геологической средой, на примере бестраншейной прокладки нового магистрального газопровода под действующей железной дорогой (рисунок 4.62).



Рисунок 4.62 – Участок пересечения новой линии газопровода с железной дорогой

Рабочий котлован для монтажа механизированной установки, заложенный в подножии моренной гряды, был пройден на глубину 3 м и уперся в глыбовый грунт, не достигнув проектной глубины (рисунок 4.63).



Рисунок 4.63 – Рабочий котлован для монтажа механизированной установки не достиг проектной глубины

В основании котлована залегает валунный грунт с песчаным заполнителем. Дальнейшая проходка до проектных отметок без применения буровзрывных работ невозможна. Разрешение на буровзрывные работы в полосе отвода действующей железной дороги не выдаётся. Подобная реализация инженерно-геологического риска периодически имеет место в строительной практике, хотя, по понятным причинам, достоверные статистические данные по данному вопросу отсутствуют. К примеру, зарубежные специалисты отмечают высокий уровень аварийности производства БПК, в частности, горизонтального направленного бурения (Griffin J., 2001).

Нормативные документы нацеливают строительные организации на управление рисками при БПК (СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011, 2012; Planning Horizontal ..., 2004). В частности, для снижения рисков необходима достоверная информация об инженерно-геологическом разрезе и ее правильный учет. Управление рисками обеспечивается неукоснительным контролем выполнения требований нормативно-технических документов. Кроме того, рекомендуется заключение расширенных страховых договоров и создание резерва денежных средств на вновь выявленную или аварийную работу для покрытия непредвиденных расходов (СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011, 2012). Естественно, это все связано с определенными затратами.

Строители, балансируя между выполнением нормативных требований и необходимостью сокращать затраты, на практике вынуждены, прежде всего, полагаться на свой опыт и интуицию. Ведь нормативно-техническая база не успевает отвечать новациям в области

подземного строительства (Шавина Т., 2013). Так, традиционные методы предварительных геологических изысканий не могут дать достаточную по объему и составу информацию, необходимую для эффективного решения вопроса о выборе оптимального положения места пересечения. Небольшой объем буровых работ, допустимый нормативными документами (минимальное ограничение – две скважины по оси пересечения с каждой стороны железнодорожного земляного полотна (Инструкция о порядке ..., 2012), оставляет высокую степень неопределенности относительно инженерно-геологического строения межскважинного пространства в силу точечного характера бурения. Хотя, согласно инструкции, посвященной прокладке инженерных коммуникаций, например, методом горизонтального направленного бурения (ГНБ) (СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011, 2012), основой для проектирования должен служить профиль, содержащий уровни грунта по всей длине пересечения.

Предварительные геофизические исследования могут значительно снизить риски строительства, связанные с выбором соответствующего оборудования и места заложения створа пересечения. Методы инженерной геофизики, такие как электротомография и георадиолокация, дают информацию о геологическом разрезе непрерывно по линии профиля, что позволяет выделить области, неблагоприятные для БПК. В справочной литературе и нормативных документах даются рекомендации по применению метода георадиолокации при предварительном обследовании профиля трассы (СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011, 2012; Сметные нормы ..., 2006). Однако в сложных геологических условиях использование одного геофизического метода, в силу определенных технических ограничений, бывает недостаточно.

Например, канадские специалисты при геофизических исследованиях на участке проектирования бестраншейных пересечений автодорог и водных преград используют комплекс геофизических методов, состоящий из георадиолокации, электротомографии, сейсмотомографии и каротажа (Bauman P. and Nahas C., 2007). Примечательно то, что основной упор делается на геофизические методы исследований, а бурение является необходимым для заверки геофизических данных. Причем основные данные о геологическом строении участка строительства они получают на основе данных электротомографии, а метод сейсмотомографии отмечают как дорогостоящий и, как следствие, применяемый на наиболее ответственных участках проектирования. В итоге производство геофизических исследований в Канаде при бестраншейной прокладке коммуникаций приводит как к сокращению продолжительности всего строительного проекта, так и к финансовой экономии.

Каковы же границы экономической эффективности применения геофизических исследований при БПК в российских условиях? Ответ на данный вопрос является ключевым

фактором, влияющим на принятие решения инвестором (или подрядчиком) о применении методов геофизических исследований не только при осуществлении БПК, но и в целом при создании объектов транспортной инфраструктуры.

4.5.2 Методика исследований

Определим границы экономической эффективности применения комплекса методов ГРЛ и ЭТ на основе риск-подхода, используя конкретный пример количественного анализа рисков при бестраншейной прокладке коммуникаций.

Идентификация риска

Геофизическими методами для нужд проектирования БПК было исследовано 5 однотипных участков на перегоне Выборг – Каменногорск в рамках работ по организации скоростного движения пассажирских поездов на участке Санкт-Петербург – Бусловская Октябрьской железной дороги. В состав геофизических исследований входили методы электротомографии и георадиолокации.

Типовая схема расположения геофизических профилей на одном из исследуемых участков представлена на рисунке 4.64.

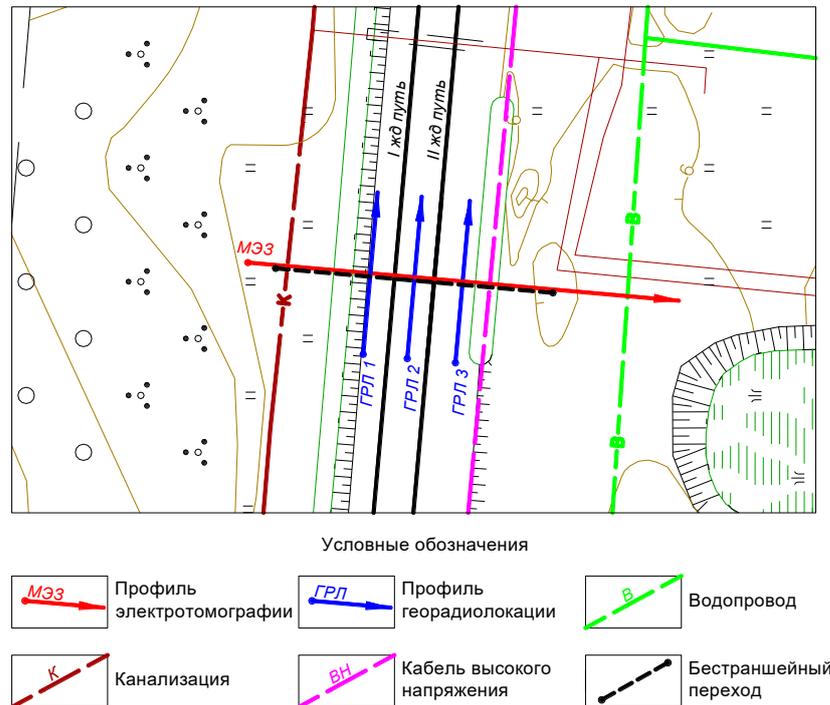


Рисунок 4.64 – Схема положения геофизических профилей на участке БПК

По результатам электротомографического исследования, профиль которого располагался вдоль оси проектируемого сооружения, был получен геоэлектрический разрез, показанный на рисунке 4.65.

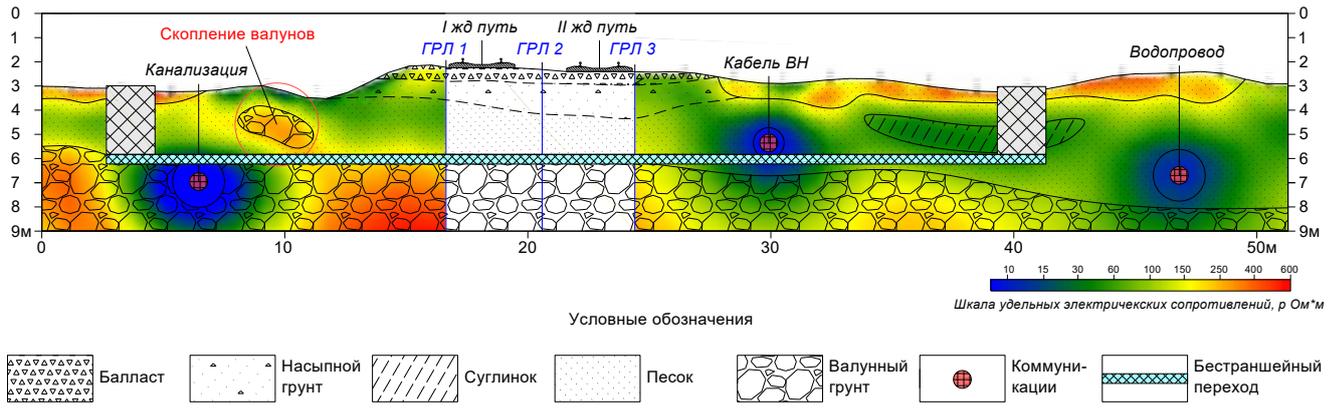


Рисунок 4.65 – Пример геоэлектрического разреза по участку, благоприятному для осуществления БПК

Из-за отсутствия возможности производства работ методом электротомографии вблизи рельсошпальной решетки методом георадиолокации была обследована верхняя часть разреза вдоль железнодорожных путей. Результаты работ методом георадиолокации по трем поперечным профилям представлены на рисунке 4.66.

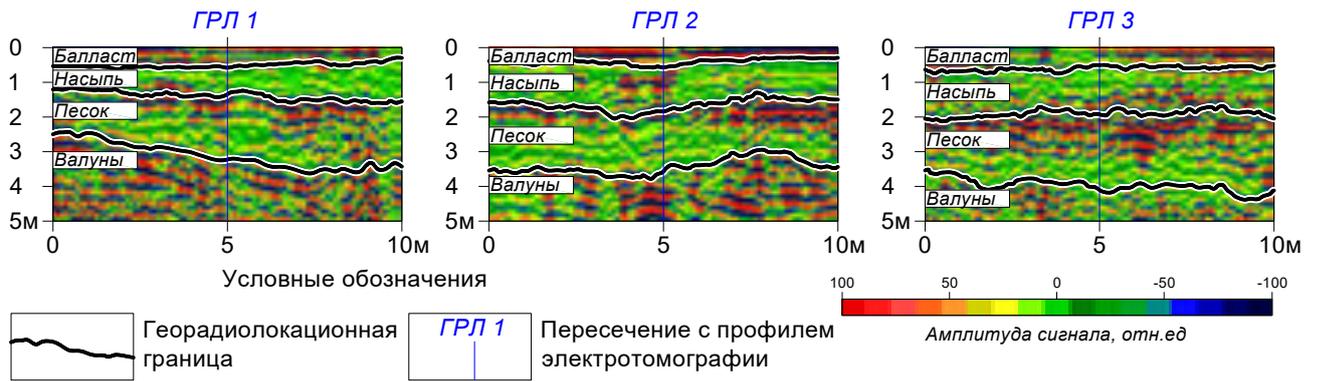


Рисунок 4.66 – Результаты георадиолокационного обследования по трем поперечным профилям

По результатам комплексных геофизических исследований выяснилось, что на двух участках из пяти негативные факторы в строении инженерно-геологического разреза, способные оказать затруднения производству БПК, отсутствуют.

На двух других участках в геологическом разрезе на проектной глубине заложения трубопровода был обнаружен валунный грунт, препятствующий безаварийному производству БПК. В качестве примера на рисунке 4.67 приведен геоэлектрический разрез одного из таких участков.

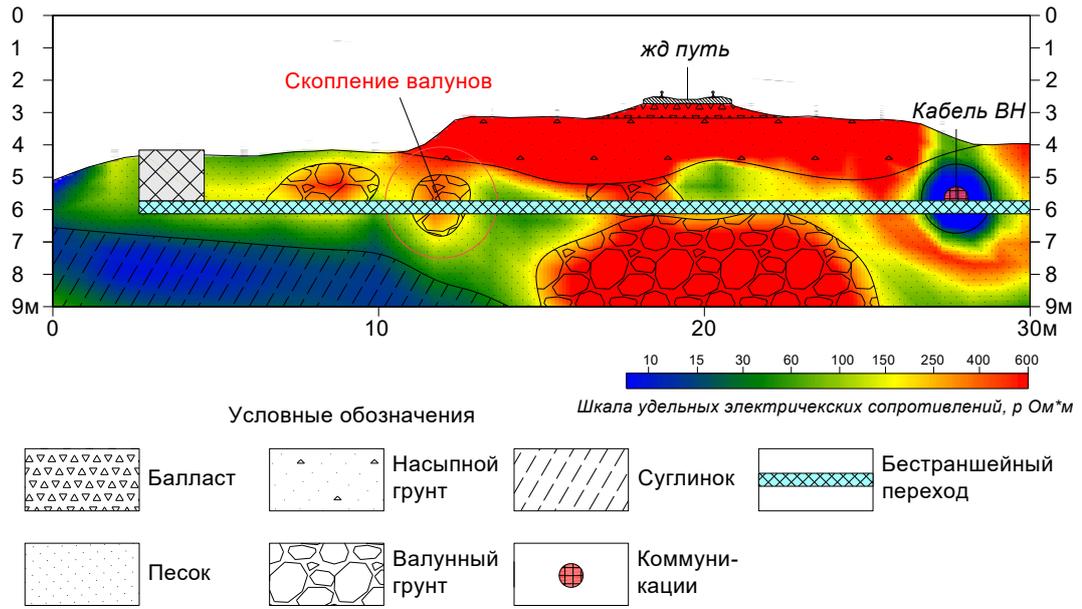


Рисунок 4.67 – Пример геоэлектрического разреза участка, неблагоприятного для осуществления БПК

Примеры геоэлектрических разрезов благоприятного и неблагоприятного участков для выполнения БПК приведены на рисунке 4.68. Скальные породы, характеризующиеся высокоомной аномалией на геоэлектрическом разрезе участка неблагоприятного для БПК, были подтверждены данными заверочного бурения.

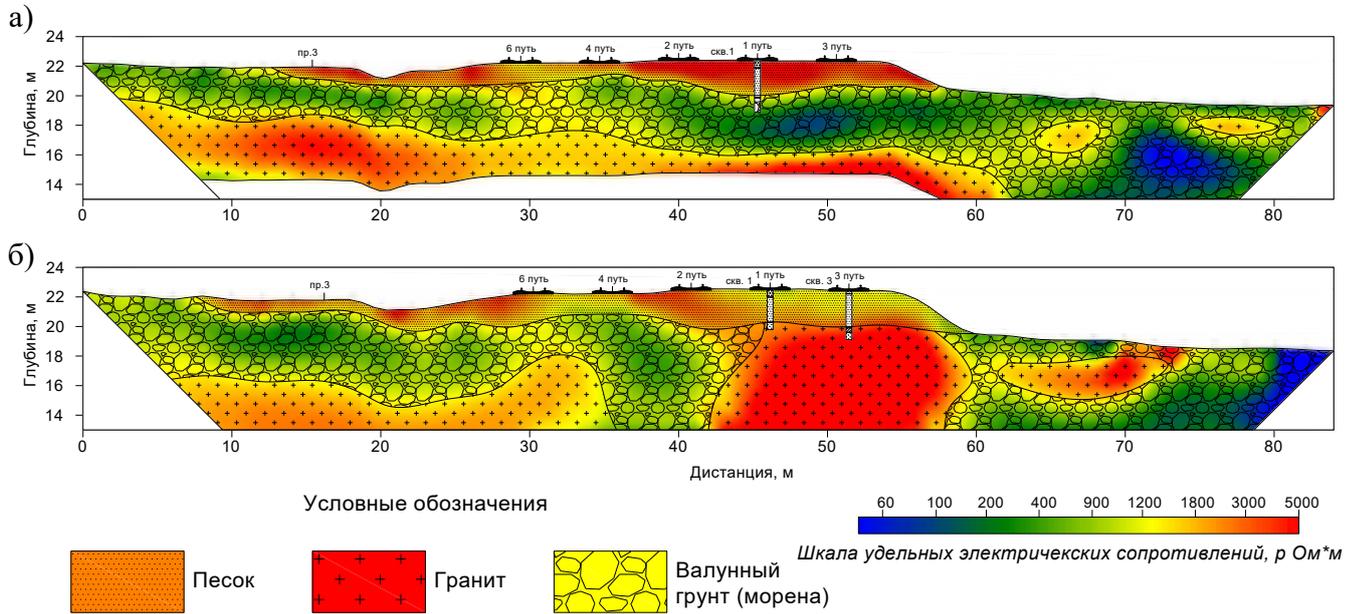


Рисунок 4.68 – Примеры геоэлектрических разрезов участка (а) благоприятного и (б) неблагоприятного для осуществления БПК

По одному из участков достоверной информации о геологическом строении на основании геофизических данных собрать не удалось ввиду большого количества техногенных помех, не позволивших получить кондиционные материалы.

Анализ и оценка риска

Объемы и стоимость производства геофизических и строительных работ по каждому из вышеописанных объектов приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Объемы и стоимость производства геофизических и строительных работ

Вид коммуникаций	Параметры бестраншейного перехода		Стоимость производства бестраншейного перехода		Объем геофизических исследований		Стоимость геофизических исследований, тыс. руб.*	Наличие или отсутствие негативных факторов по данным геофизических исследований	Вероятность, %
	<i>Диаметр, мм</i>	<i>Длина, м</i>	<i>Стоимость 1 п.м., тыс. руб.*</i>	<i>Общая стоимость, тыс. руб.</i>	<i>ГРЛ, м</i>	<i>ЭТ, точек изм.</i>			
Водопровод	560	40	12	491	100	1 000	238	+	40
Канализация	800	62	20	1 279	100	1 000	238	+	
Водопровод	1200	54	30	1 620	160	1 000	244	-	40
Канализация	1020	58	30	1 740	60	1 000	233	-	
Водопровод	710	41	20	846	30	1 300	271	+/- (?)	20

* указана примерная рыночная стоимость работ на 2013 год

В двух последних столбцах показана экспериментально полученная результативность производства геофизических исследований, которая характеризуется процентной вероятностью обнаружения или не обнаружения негативных факторов, влияющих на успешное выполнение БПК.

В качестве комментария к последней строке таблицы 4.4 следует отметить, что геофизические исследования не являются универсальным инструментом по предотвращению рисков, т.к. их результативность в ряде случаев носит вероятностный характер. Данная специфика использования геофизики в транспортном строительстве отмечается также и американскими исследователями. По их статистическим данным каждый седьмой геофизический проект оказывается неудачным (Anderson N. et al., 2008). В нашем примере один из пяти проектов закончился неудачно.

Экспериментально полученные данные были использованы при моделировании, цель которого состояла в выявлении зависимости между вероятностью завершения проекта и его стоимостью для двух различных вариантов. Рассматривались два проекта, производство которых

гипотетически возможно в данных инженерно-геологических условиях с экспериментально определённым уровнем риска. Один с использованием геофизических исследований, второй – без таковых. Во втором варианте строительный риск, связанный с недостаточным количеством информации, снижается с 40% до $40\% \times 20\% = 8\%$ (остаточный риск), но увеличивается общая стоимость проекта за счет затрат на геофизические исследования, положительный результат которых также является вероятностным при неоднозначности данных в 20% случаях. В процессе моделирования, в случае реализации риска на каком-либо из этапов, выполнение данного этапа начиналось заново, что увеличивало стоимость всего проекта. Количество испытаний в процессе моделирования для каждого из предложенных вариантов проекта составило 200.

В таблице 4.5 приведены исходные данные для риск-расчетов, полученные на основе данных, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.5 – Исходные данные для риск-расчетов

<i>Проект без использования инженерно-геофизических исследований</i>					
<i>Этап</i>	<i>Риск</i>	<i>Вероятность реализации риска, %</i>	<i>Стоимость работ, тыс. руб.</i>		
			<i>минимальная</i>	<i>средняя</i>	<i>максимальная</i>
1. Бестраншейная прокладка коммуникаций	Недостаточно информации	40	500	1 200	1 700
<i>Проект с использованием инженерно-геофизических исследований</i>					
1. Инженерно-геофизические исследования	Неоднозначность данных	20	233	250	271
2. Бестраншейная прокладка коммуникаций	Недостаточно информации	8	500	1 200	1 700

В качестве инструмента для проведения риск-расчетов использовался известный программный пакет Risky Project Professional версии 5.0 (Risky Project ..., 2012), в основе которого лежит логико-вероятностное моделирование с применением метода Монте-Карло (Коваленко Г.В., 2011; Metropolis N. and Ulam S., 1949). В экономических расчетах данный метод позволяет учитывать весь диапазон неопределенностей входящих параметров, которые могут существенно повлиять на осуществление проекта. Метод позволяет получать интервальные значения проектных показателей рисков, в границах которых может быть успешно реализован реальный инвестиционный проект.

На рисунках 4.69 и 4.70 изображены результаты расчетов зависимости вероятности окончания проекта от его стоимости для вариантов с использованием геофизических исследований и без их использования соответственно.

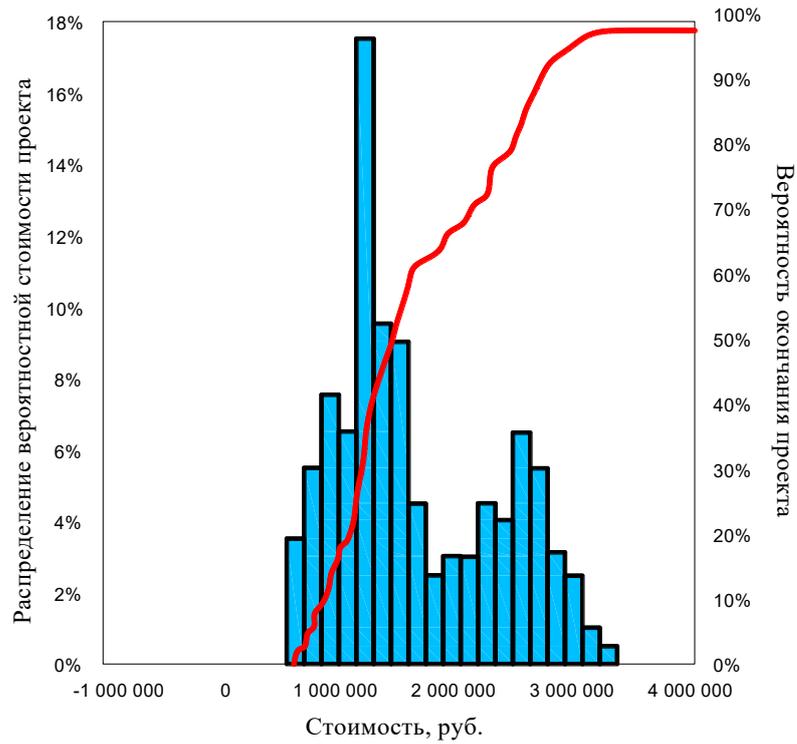


Рисунок 4.69 – Результаты расчета влияния рисков на общую стоимость проекта без геофизических исследований

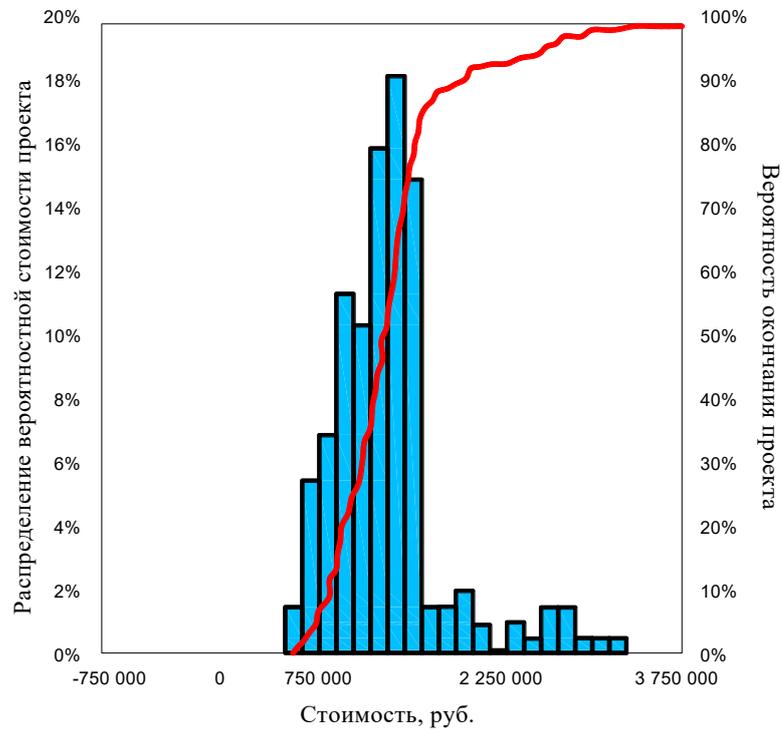


Рисунок 4.70 – Результаты расчета влияния рисков на общую стоимость проекта с геофизическими исследованиями

На рисунке 4.71 изображено сопоставление результатов. С учетом реальной точности выполненных расчетов можно утверждать, что в интервале вероятностей 0 – 60% удачного завершения проект с геофизическими исследованиями обходится, как правило, дороже, чем без последних, а в интервале 61 – 100% вероятности – дешевле. Интервал 86 – 100% для проекта с геофизическими исследованиями характеризуется относительно резким увеличением затрат на каждый процент повышения вероятности удачного завершения, несмотря на то, что стоимость такого проекта остается все равно ниже, чем у проекта без геофизических исследований.

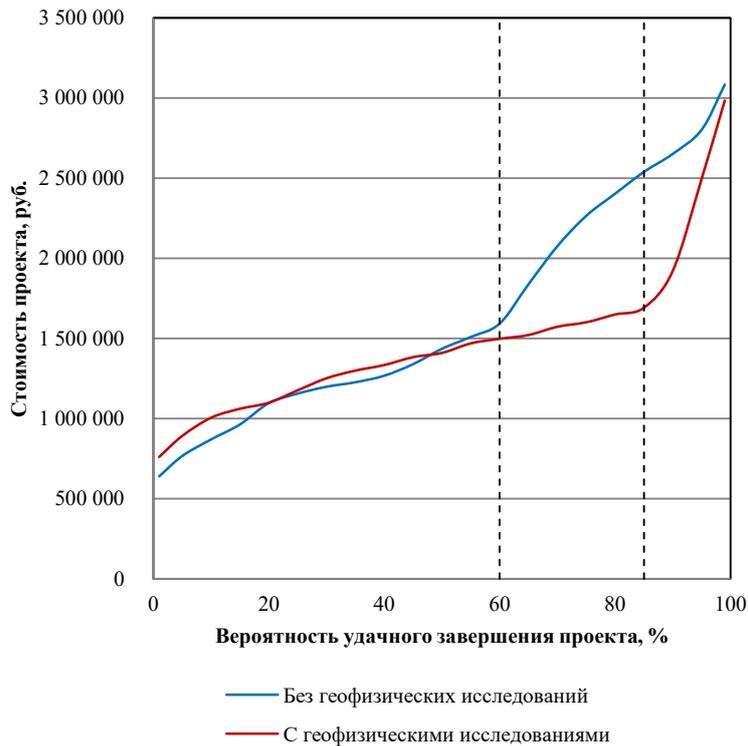


Рисунок 4.71 – Сравнение вероятной стоимости проектов

4.5.3 Результаты исследований

На рисунке 4.72 изображен график зависимости экономической эффективности и выгоды использования геофизических исследований от вероятности удачного завершения проекта БПК. Для наглядности по характерным точкам перегиба полученного графика условно разобьем область вероятности удачного завершения проекта на три участка – зона безразличия (0-60%), зона эффективности (61-85%) и зона маргинальной неэффективности (86-100%).

Первый участок находится в интервале от 0 до 60%. Участок характеризуется высокой степенью неопределенности и низким уровнем результативности. Применение современных методов геофизических исследований здесь бессмысленно – это зона работы на основе опыта и интуиции.

Второй участок находится в интервале 61-85%. Участок характеризуется высокой степенью определенности и результативности. Геофизические исследования здесь экономически оправданы – это зона «рационального минимума неопределенности», нахождение в которой для инвестора (подрядчика) рентабельно. Экономическая эффективность геофизических исследований в данной области составляет от 140 до 440%.

Третий участок находится в интервале 86-100%. Участок характеризуется избыточной степенью определенности и результативности. Каждый процент повышения вероятности удачного завершения проекта требует затрат больших чем в интервале 61-85% (видно из рисунка 4.71). Применение геофизических исследований здесь нерационально – это зона «минимальной неопределенности», при работе в которой высока маргинальная неэффективность затрат.

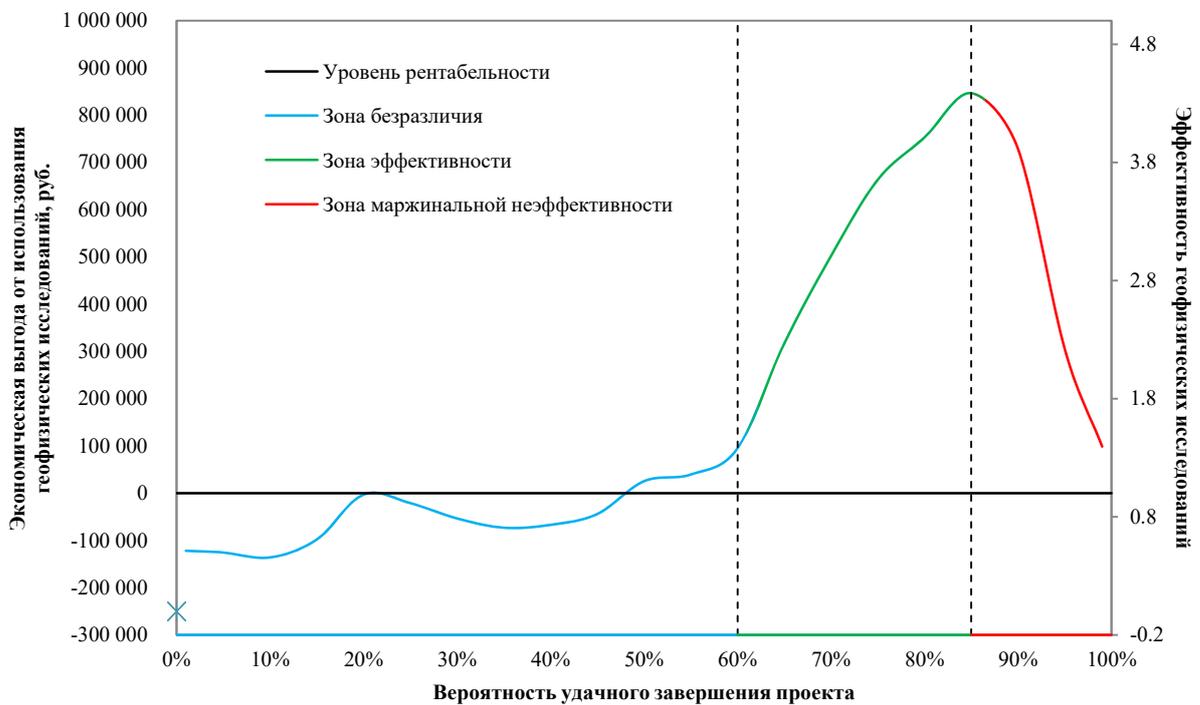


Рисунок 4.72 – Экономическая выгода проведения геофизических исследований

Таким образом, при выполнении работ по БПК, применение геофизических исследований является оптимальным выбором для инвестора (подрядчика), что в рамках установленных конкурентоспособных бюджетных ограничений и сроков обеспечивает вероятность удачного завершения проекта до 85%. Такой выбор обеспечивает подрядчику стабильные и надежные результаты работы в целом, а инвестору – эффективность своих инвестиционных решений.

4.5.4 Выводы по разделу

1. Бестраншейная прокладка коммуникаций в сложных инженерно-геологических условиях связана с высоким уровнем рисков, снижение которых может осуществляться посредством использования геофизических методов исследования в рамках стандартных процедур управления рисками проектов.
2. Величина экономической эффективности инженерно-геофизических исследований (в частности, комплекса георадиолокации и электротомографии) носит вероятностный характер.
3. Экономическая эффективность геофизических исследований может быть обоснована и представлена в виде реальных стоимостных показателей.
4. Если целью строителей является получение стабильных и надежных результатов, то производство геофизических исследований будет экономически эффективно, а инвестиционные затраты на их проведение будут оправданы с высоким уровнем рентабельности.

Результаты проведенных расчетов для конкретного примера бестраншейной прокладки коммуникаций показали, что на графике зависимости экономической эффективности геофизических исследований от вероятности удачного завершения проекта выделяются три области. Одна из них характеризуется рациональным минимумом неопределенности 60-85% и отвечает показателям эффективности от 140 до 440% на единицу затрат. Две другие, по тем или иным причинам, являются неэффективными.

Что же касается других объектов инфраструктуры, то вопросы экономической взаимосвязи строительства и инженерных изысканий для них на данный момент остаются открытыми. Одним из перспективных направлений эффективного взаимодействия строительных и изыскательских организаций на сегодняшний день может являться грамотное использование современных подходов к управлению рисками. Проблема оценки эффективности инженерных изысканий в данном контексте заключается в отсутствии достоверных статистических данных об аварийных ситуациях, возникших в ходе строительства по причине недостаточности сведений о геологическом строении. Решением может служить документирование и статистический учет подобной информации с открытым доступом, например, на уровне саморегулируемых организаций. Геофизические исследования, в свою очередь, могут играть значительную роль в повышении эффективности строительных проектов, таких как бестраншейная прокладка коммуникаций. Причем целесообразность проведения геофизических исследований может быть экономически обоснована путем использования механизма управления рисками.

Выводы к главе 4

Рассмотренные практические примеры показывают необходимость, целесообразность, техническую и экономическую эффективность комплексирования методов георадиолокации и электротомографии для решения целого ряда инженерно-геологических задач на объектах транспортного строительства, в том числе в условиях отсутствия возможности гальванических заземлений на асфальтовом покрытии и мерзлом грунте.

Среди них оценка однородности геологического строения песчано-глинистых разрезов естественных и искусственных оснований, контроль качества формирования насыпей земляного полотна и дорожной одежды и многие другие.

На этой основе формулируется третье защищаемое положение: комплексное применение методов георадиолокации и электротомографии обеспечивает детальное изучение геологического строения и состояния песчано-глинистых разрезов оснований инженерных сооружений, контроль качества формирования насыпей земляного полотна и дорожной одежды на этапах изысканий, строительства и эксплуатации линейных объектов транспортной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди основных решенных задач можно отметить теоретическое и практическое обоснование комплекса георадиолокации и электротомографии, системная реализация которого дает возможность получать согласованную геолого-геофизическую модель, характеризующуюся не только отсутствием противоречий внутри рассмотренного комплекса геофизических методов ГРЛ и ЭТ, но и соответствием инженерно-геологическим данным. Постулатом рассмотренного подхода к комплексированию ГРЛ и ЭТ является утверждение о том, что только согласованные геофизические данные могут лежать в основе количественной интерпретации геофизических аномалий с выходом на оценку, прогноз, или, в некоторых случаях, расчет инженерно-геологических параметров и характеристик исследуемого разреза.

Исследования показали, что в большинстве случаев определение геометрических параметров элементов строения верхней части песчано-глинистого разреза комплексом ГРЛ и ЭТ задача сложная, но выполнимая. Между тем, говоря об определении количественных инженерно-геологических характеристик на основе геофизических данных, остается открытым вопрос степени соответствия получаемого результата реальной действительности. Несомненно, электрофизические параметры являются чувствительными индикаторами, характеризующими изменения инженерно-геологических характеристик песчано-глинистых грунтов, но многообразие существующих петрофизических взаимосвязей не дает возможности с уверенностью определять те или иные характеристики на основе только монометодных исследований. Именно поэтому имеющие общие электрофизические основы методы ГРЛ и ЭТ рассмотрены в едином комплексе, объединенном параметром добротности, позволяющим связать удельное электрическое сопротивление и комплексную диэлектрическую проницаемость, в состав которой входят мнимая и действительная части.

Большое внимание в работе уделено исследованию влияния минерализации поровой влаги на параметр добротности, получаемый на основе георадиолокационных данных, что позволило впервые в условиях лабораторной баковой модели получить эмпирические зависимости добротности от минерализации на георадиолокационных частотах. На основе зависимости отношения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости от содержания глинистых частиц предложен подход к оценке фильтрационных свойств песчано-глинистых грунтов, который был успешно опробован на практическом примере исследования дренирующего слоя новой автодороги.

Особое внимание в работе уделено практической реализации электротомографии в режиме бесконтактных измерений, которая показала свою эффективность в условиях работы на многолетнемерзлых грунтах Крайнего Севера и асфальтовом покрытии автодорог.

Дальнейшее развитие комплекса георадиолокации и электротомографии связано с получением детальных песчано-глинистых разрезов и количественной оценкой инженерно-геологических характеристик на основе определения электрофизических параметров.

В основу описанных в диссертации исследований легли как результаты математического и физического моделирования, так и опытно-методические и производственные работы, выполненные на различных объектах транспортного строительства, что позволило связать между собой теорию и практику, науку и производство, инженерную геологию и геофизику. Таким образом, работа удачно сочетает в себе теоретическую и практическую части и результаты исследований будут полезны как научным работникам, так и специалистам, работающим в прикладных направлениях инженерной геологии и геофизики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Альпин Л.М.** Теория полей, применяемых в разведочной геофизике: учебник для вузов / Л.М. Альпин, Д.С. Даев, А.Д. Каринский. – М.: Недра, 1985. – 407 с.
2. **Ампилов Ю.П.** От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. – М.: ООО “Издательство “Спектр”, 2008. – 384 с.
3. **Артеменко И.В.** Моделирование частотной дисперсии диэлектрической проницаемости мерзлых геологических сред и ее влияния на переходную характеристику незаземленной петли: автореф. дис. ... канд. г-мн. наук. – Иркутск: 1999. – 20 с.
4. **Белецкий Б.Ф.** Технология и механизация строительного производства: учебник. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. – 752 с.
5. **Бобачев А.А.** Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин. – М.: Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ “Геоинформмарк”, 1996. – 50 с.
6. **Боганик Г.Н.** Сейсморазведка: Учебник для вузов / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. – Тверь: Изд-во АИС, 2006. – 744 с.
7. **Богданов М.И.** Экономика изысканий: пособие для экспертов / М.И. Богданов, Э.Р. Черняк // Инженерные изыскания. – 2008. – № 3. – С. 20-26.
8. **Бричева С.С.** Георадиолокационные исследования приповерхностных многолетнемерзлых пород на Гыданском полуострове / С.С. Бричева, С.С. Крылов // Инженерные изыскания. – 2014. – № 9-10. – С. 38-45.
9. **Бродовой В.В.** Комплексирование геофизических методов / В.В. Бродовой. – М.: Недра, 1991. – 330 с.
10. **Великин С.А.** Вопросы применения георадиолокации в криолитозоне на примере изучения состояния инженерных сооружений // Разведка и охрана недр. – 2008. – №1. – С. 28-31.
11. **Глазунов В.В.** Комплексирование данных георадиолокации и вертикального электрозондирования методом сопротивлений для изучения песчано-глинистых разрезов / В.В. Глазунов, К.М. Ермохин, Н.Н. Ефимова, Б.Г. Сапожников. Тезисы конференции “Георадар-2002”. – М.: МГУ, 2002. – С. 40-42.
12. **Глазунов В.В.** Применение метода георадиолокации для поиска и разведки месторождений песка / В.В. Глазунов, Н.Н. Ефимова, А.В. Никифоров // Георадары, дороги-2000: Материалы Междунар. науч.-техн. семинара. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – С. 18-23.

13. **Глазунов В.В.** Комплексные электроразведочные исследования состояния мерзлых песков насыпей для проектирования строительных работ в условиях Крайнего Севера / В.В. Глазунов, Д.А. Лаломов, Н.Н. Ефимова, А.В. Куликов. Материалы 12-го Международного геофизического научно-практического семинара “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. – СПб.: НМСУ ”Горный”, 2015. – С. 156-158.
14. **Глазунов В.В.** Физико-геологическое обоснование комплексирования методов георадиолокации и электротомографии / В.В. Глазунов, Д.А. Лаломов // Материалы 12-ой Общероссийской конференции изыскательских организаций “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. – М.: ООО “Геомаркетинг”, 2016. – С. 369-376.
15. **Глазунов В.В.** Комплексирование методов сопротивления и георадиолокации для оценки состояния дорожной одежды автомобильных дорог / В.В. Глазунов, Д.А. Лаломов // Материалы 13-го Международного геофизического научно-практического семинара “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых” Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. – С. 173-176.
16. **ГОСТ 25607-2009.** Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2010. – 9 с.
17. **ГОСТ 32836-2014** Автомобильные дороги общего пользования. Изыскания автомобильных дорог. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 53 с.
18. **ГОСТ 32868-2014** Автомобильные дороги общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий. – М.: Стандартинформ, 2015. – 57 с.
19. **ГОСТ Р 51897-2011.** Руководство ИСО 73:2009. Менеджмент риска. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 11 с.
20. **ГОСТ Р ИСО 31000-2010.** Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2012. – 19 с.
21. **Груздев А.И.** Бесконтактное измерение электрического поля с помощью Ohm Mapper в условиях Крайнего Севера / А.И. Груздев, Д.А. Науменко, П.С. Богданов, А.А. Бобачев, В.А. Шевнин // Электронное научное издание “Георазрез”, 2013. – №1. – 22 с.
22. **Грунтоведение** / Под ред. В.Т. Трофимова, 6-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.

23. **Данильев С.М.** Обоснование методики георадиолокационных исследований зон деструкции инженерно-геологических объектов: автореф. дис. ... канд. г-мн. наук. – СПб.: 2011. – 20 с.
24. **Данильев С.М.** Оценка технического состояния дорожной одежды на основе комплексного геолого-георадиолокационного подхода / С.М. Данильев, Н.А. Данильева, Г.Б. Поспехов // Материалы 11-ой Общероссийской конференции изыскательских организаций “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. – М.: Академическая наука, 2015. – С. 156-158.
25. **Дахнов В.Н.** Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. – Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 1951. – 428 с.
26. **Добронравов С.С.** Строительные машины и основы автоматизации: учебник для строительных вузов / С.С. Добронравов, В.Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
27. **Ефимова Н.Н.** Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: 1999. – 16 с.
28. **Зинченко В.С.** Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: Учебное пособие для студентов вузов. – М. -Тверь: Изд-во АИС, 2005. – 392 с.
29. **Изюмов С.В.** Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М.: Изд-во “Горная книга”, Изд-во Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
30. **Инструкция** о порядке выбора места, выдачи технических условий, согласования проектной документации и организации технического надзора при пересечении железнодорожных путей ОАО "РЖД" различными инженерными коммуникациями. – М.: ОАО "РЖД", 2012.
31. **Инструкция** по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. – М.: Минтрансстрой, 1985. – 318 с.
32. **Инструкция** пользователя. Prism2. – Рига: Radar Systems Inc, 2015. – 59с.
33. **Каминский А.Е.** Инструкция к программе двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации ZondRes2D. – С-Пб.: Zond geophysical software, 2012. – 70 с.
34. **Климентов П.П.** Общая гидрогеология / П.П. Климентов, Г.Я. Богданов. – М.: Недра, 1977. – 357 с.

35. **Коваленко Г.В.** Управление рисками нововведений. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. – 143 с.
36. **Комплексирование методов разведочной геофизики.** Справочник геофизика. Под ред. В.В. Бродового и А.А. Никитина. – М.: Недра, 1984. – 384 с.
37. **Крылов С.С.** Геоэлектрика: Поля искусственных источников: учебное пособие / С.С. Крылов. – СПб.: Издательство СПбГУ, 2004. – 138 с.
38. **Кудрявцев Ю.И.** Теория поля и ее применение в геофизике: Учебник для вузов / Ю.И. Кудрявцев. – Л.: Недра, 1988. – 335с.
39. **Кулижников А.М.** Назначение ремонтных работ по результатам георадарных обследований / А.М. Кулижников, А.А. Белозеров, С.П. Бурда // Дороги России XXI века, 2003. – № 5. – С. 68-71.
40. **Кулижников А.М.** В разведку с георадаром. О применении георадаров при диагностике автомобильных дорог // Автомоб. Дороги, 2002. – № 2. – С. 10-11.
41. **Кулижников А.М.** Георадарные технологии в проектах автомобильных дорог // Дороги России XXI века, 2003. – № 4. – С.70-72.
42. **Кулижников А.М.** Применение георадарных технологий в дорожном хозяйстве // Разведка и охрана недр, 2001. – № 3. – С.32-34.
43. **Кулижников А.М.** Георадары в дорожном строительстве / А.М. Кулижников, М.А. Шабашова. М.: Информавтодор. Автомоб. дороги: Обзорн. информ. Вып. 2, 2000. – 52 с.
44. **Кунин Н.Я.** Комплексирование геофизических методов при геологических исследованиях / Н.Я. Кунин. – М.: Недра, 1972. – 267 с.
45. **Кутвицкая Н.Б.** Особенности проектирования фундаментов опор линейных сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / Н.Б. Кутвицкая, М.А. Магомедгаджиева, А.В. Рязанов // Воздушные линии. – 2013. – № 2. – С. 28-32.
46. **Кутвицкая Н.Б.** Проектирование оснований и фундаментов объектов обустройства нефтегазоконденсатных месторождений в сложных мерзлотно-грунтовых условиях / Н.Б. Кутвицкая, М.А. Манкин // Строительство на многолетнемерзлых грунтах. – 2014. – №1. – С. 21-25.
47. **Лаломов Д.А.** О границах экономической эффективности применения геофизических исследований при бестраншейной прокладке коммуникаций / Д.А. Лаломов, Г.В. Коваленко, А.И. Артюгин // Инженерные изыскания. – 2013. – №13. – С. 18-25.
48. **Лаломов Д.А.** Особенности совместной обработки и интерпретации данных электротомографии и георадиолокации в условиях влияния техногенных помех на

- объектах транспортного строительства / Д.А. Лаломов, А.И. Артюгин // Георесурсы. – 2014. – №3(58). – С. 37-40. – DOI: 10.18599/grs.58.3.7
49. *Лаломов Д.А.* Определение электрофизических параметров песчано-глинистого разреза при комплексном использовании георадиолокации и электротомографии / Д.А. Лаломов, В.В. Глазунов // Инженерные изыскания. – 2015. – №5-6. – С. 58-69.
50. *Лаломов Д.А.* Расчет экономической эффективности выполнения инженерно-геофизических работ на основе риск-подхода / Д.А. Лаломов, Г.В. Коваленко // Инженерные изыскания. – 2013. – № 1. – С. 36-40.
51. *Лаломов Д.А.* Совместная обработка и интерпретация данных электротомографии и георадиолокации в рамках решения инженерно-геологических задач транспортного строительства // Материалы 11-го Международного геофизического научно-практического семинара “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых” Санкт-Петербург: НМСУ “Горный”, 2013. – С. 160-163.
52. *Лаломов Д.А.* Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных / Д.А. Лаломов, В.В. Глазунов // Георесурсы. – 2017. – №1. – С. 69-77. – DOI: 10.18599/grs.19.1.1
53. *Лаломов Д.А.* Учет влияния гранулометрического состава грунтов при расчете удельного электрического сопротивления по данным ЭДЗ // Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного 100-летию со дня рождения Л.Б. Рухина. Том II. – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2012. – С. 160-163.
54. *Лешиков Ф.Н.* Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. – Новосибирск: Наука, 1978. – 136 с.
55. *Ляховицкий Ф.М.* Инженерная геофизика / Ф.М. Ляховицкий, В.К. Хмелевской, З.Г. Яценко. – М.: Недра, 1989. – 252 с.
56. *Матвеев Б.К.* Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1982. – 376 с.
57. *Матвеев В.С.* Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований/ В.С. Матвеев, А.А. Рыжов // Разведка и охрана недр. – 2006. – №2. – С.50-57
58. *Матвеев В.С.* Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / В.С. Матвеев, В.Н. Чубаров, Г.Я. Черняк. – М.: Недра, 1985. – 184 с.

59. **Методические рекомендации** по осушению земляного полотна и оснований дорожных одежд в районах избыточного увлажнения и сезонного промерзания грунтов. – М.: Союздорнии, 1974. – 118 с.
60. **Методические рекомендации** по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. – М.: Росавтодор, 2004. – 37с.
61. **Модин И.Н.** Сравнение бесконтактных электроразведочных комплексов / И.Н. Модин, А.И. Груздев, А.Д. Скобелев // Инженерные изыскания. – 2016. – №2. – С. 46-52.
62. **Модин И.Н.** Электроразведка в технической и археологической геофизике: автореф. дис. ... док. тех. наук. – М.: 2010. – 48 с.
63. **Нахабцев А.С.** Электропрофилирование с незаземлёнными рабочими линиями / А.С. Нахабцев, Б.Г. Сапожников, А.И. Яблчанский. – Л.: Недра, 1985. – 96 с.
64. **Никитин А.А.** Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. – Тверь: ООО “Издательство ГЕРС”, 2004. – 294 с.
65. **ОДМ 218.02.37-2012** Методические рекомендации на проведение изыскательских работ при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог. – М.: Росавтодор, 2013.
66. **ОДМ 218.3.075-2016** Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации. – М.: Росавтодор, 2016. – 75 с.
67. **ОДМ 218.2.055-2015** Рекомендации по расчету дренажных дорожных конструкций. – М.: Росавтодор, 2015. – 83 с.
68. **ОДН 218.0.006-2002** Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. – М.: Росавтодор, 2004. – 37с.
69. **Огильви А.А.** Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / под ред. В.А. Богословского. – М.: Недра, 1990. – 501 с.
70. **Павлова А.М.** Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред: дис. ... канд. тех. наук. – М.: 2014. – 128 с.
71. **Половков В.В.** Совместное использование преломленных и отраженных волн для построения глубинно-скоростной модели среды: автореф. дис. ... канд. гео-мин. наук. – СПб.: НМСУ “Горный”, 2012. – 20 с.
72. **Программа инновационного развития** ОАО "Российские железные дороги" на период до 2015 года. – М.: ОАО "РЖД", 2011. – 339 с.
73. **Рекомендации** по применению геофизических методов для определения инженерно-геологических характеристик мерзлых дисперсных грунтов. – М.: Строиздат, 1984. – 32 с.

74. **Рекомендации** по осушению дорожных одежд и верхней части земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Министерство строительства и эксплуатации автомобильных дорог РСФСР, 1970. – 62 с.
75. **Руководство пользователя.** RadExPro. – М.: Deco Geophysical software company, 2016. – 632с.
76. **Рыбаков А.П.** Основы бестраншейных технологий (теория и практика): технический учебник-справочник. – М.: Пресс-Бюро № 1, 2005. – 304 с.
77. **Рыжов А.А.** Основные закономерности вызванной поляризации горных пород // Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых. – М.: изд-во МГРИ, 1987. – С. 5-23.
78. **Рыжов А.А.** Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач / А.А. Рыжов, А.Д. Судоплатов // Научно- техн. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. – М.: 1990. – С. 27-41.
79. **Савин В.А.** Построение 3D модели инженерно-геологической среды по данным георадиолокации / В.А. Савин, А.И. Артюгин, Д.А. Лаломов // Инженерные изыскания. – 2012. – № 9. – С. 33-39.
80. **Садовский И.Н.** Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. – М.: ФГБУН ИКИ РАН, 2013. – 60 с.
81. **Сметные нормы и расценки** на новые технологии в строительстве. Часть 2 / под ред. П.В. Горячкина. – М.: 2006. – 117 с.
82. **СП 11-105-97** Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. 6. Правила производства геофизических исследований. – М.: Госстрой России, 2004. – 50 с.
83. **СП 22.13330.2011** Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 “Основания зданий и сооружений”. – М.: Минрегион России, 2011. – 161 с.
84. **СП 25.13330.2012** Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах”. – М.: Минрегион России, 2011. – 117 с.
85. **СП 47.13330.2012** Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М.: Минрегион России, 2012. – 111 с.
86. **СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011** Прокладка подземных инженерных коммуникаций методом горизонтального направленного бурения. – М.: НОСТРОЙ, 2012. – 135 с.

87. **Старовойтов А.В.** Интерпретация георадиолокационных данных. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.
88. **Стрэттон Дж. А.** Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1948. – 539 с.
89. **Судакова М.С.** Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях: автореф. дис. ... канд. физ. мат. наук. – М.: МГУ, 2009. – 24 с.
90. **Тархов А.Г.** Комплексование геофизических методов / А.Г. Тархов, В.М. Бондаренко, А.А. Никитин. – М.: Недра, 1982. – 295 с.
91. **Финкельштейн М.И.** Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин. – М.: Радио и Связь, 1994. – 216 с.
92. **Финкельштейн М.И.** Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев. – М.: Недра, 1986. – 128 с.
93. **Финкельштейн М.И.** Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.А. Мендельсон, В.А. Кутев. – М.: Сов. Радио, 1977. – 176 с.
94. **Фридрихсберг Д.А.** Курс коллоидной химии: Учебник для вузов. – 3-е изд., исправл. – СПб.: Химия, 1995. – 400 с.
95. **Фролов А.Д.** Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. – 515 с.
96. **Хмелевской В.К.** Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Учебное пособие. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека “Дубна”, 1999. – 184 с.
97. **Хмелевской В.К.** Основные задачи и подходы в отечественной инженерной геофизике / В.К. Хмелевской, Л.А. Золотая, А.А. Бобачев, И.Н. Модин // Разведка и охрана недр. – 2005. – №2. – С. 2-5.
98. **Электрическое зондирование геологической среды.** Ч. 1. Под ред. Хмелевского В.К. и Шевнина В.А. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 175 с.
99. **Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
100. **Шавина Т.** Почему в России не внедряются бестраншейные технологии // Строительство.RU: всероссийский отраслевой интернет-журнал. – Июнь 2013. – Режим доступа: <http://www.rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/21803-pochemu-v-rossii-ne-vnedryayutsya-bestransheyne-tehnologii.html>

101. **Шевнин В.А.** Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений / В.А. Шевнин, А.А. Рыжов, О. Делгадо-Родригес // Геофизика. – 2006. – №4. – С. 37-43.
102. **Шорин В.А.** Оценка точности нормативных косвенных методов определения пучинистых свойств грунта / В.А. Шорин, Г.Л. Каган, А.Ю. Вельсовский // Транспортное строительство. – 2013. – № 9. – С. 27-29.
103. **Электроразведка методом сопротивлений.** Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. – М.: МГУ, 1994. – 160 с.
104. **Якубовский Ю.В.** Электроразведка / Ю.В. Якубовский, И.В. Ренард. – 3-е изд. – М.: Недра, 1991. – 359 с.
105. **Anderson N.** Geophysical methods commonly employed for geotechnical site characterization / N. Anderson, N. Croxton, R. Hoover, P. Sirles / Transportation Research Circular № E-C130. Washington DC, USA: Transportation Research Board of the National Academies, 2008. – 35 p. – DOI: 10.17226/23073
106. **Annan A.P.** Ground Penetrating Radar: Workshop Notes. – Ontario, Canada: Sensors and Software Inc., 2001. – 192 p.
107. **Archie G.E.** The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Society of Petroleum Engineers. Transactions of the AIME. – Vol. 146, 1942. – P. 54-62. – DOI: 10.2118/942054-G
108. **ASTM D6429-99** (2011) e1. Standard guide for selecting surface geophysical methods. – West Conshohocken, USA: ASTM International, 2011. – 11 p.
109. **ASTM D6432-99** Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation. – West Conshohocken, USA: ASTM International, 2005. – 17 p.
110. **Bano M.** Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves // Geophysical Journal International. – 1996. – №124. – P. 279-288. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06370.x.
111. **Bano M.** Modelling of GPR waves for lossy media obeying a complex power law of frequency for dielectric permittivity // Geophysical prospecting. – 2004. – №52. – P. 11-26. – DOI: 10.1046/j.1365-2478.2004.00397.x
112. **Bâth M.** Spectral Analysis in Geophysics. Developments in Solid Earth Geophysics. V.7. – Amsterdam: Elsevier Scientific Publication Company, 1974. – 563 p. – ISBN 10: 0444412220 ISBN 13: 9780444412225
113. **Bauman P.** Near surface geophysics as an aid to horizontal drilling for pipeline construction / P. Bauman, C. Nahas // CSEG Recorder. – 2007. – № 43. – P. 41-44.

114. **Charles E.E.** Using ERI to Apply an Inverse Q* Filter to GPR Data / E.E. Charles, J.M. Maillol // Back to Exploration – 2008 CSPG CSEG CWLS Convention, 2008. – P. 127-131.
115. **Constable S.C.** Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data / S.C. Constable, R.L. Parker, C.G. Constable // Geophysics. – 1987. – Vol. 52. – № 3. – P. 289-300. – DOI: 10.1190/1.1442303
116. **Curtis J.O.** Moisture effects on the dielectric properties of soils // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39. – P. 125-128. – DOI: 10.1109/36.898673
117. **Dahlin T.** A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays / T. Dahlin, B. Zhou // Geophysical Prospecting. – 2004. – Vol. 52. – P. 379-398. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x
118. **Dahlin T.** Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging / T. Dahlin, B. Zhou // Near Surface Geophysics. – 2006. – Vol. 4. – № 2. – P. 113-123. – DOI: 10.3997/1873-0604.2005037
119. **Daniels D.J.** Surface Penetrating Radar. 2-nd Edition. – London: IEE, 1996. – 752 p. – DOI: 10.1049/PBRA015E
120. **Dasberg S.** Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils / S. Dasberg, J.W. Hopmans // Soil Science Society of America Journal. – 1992. – Vol. 5. – P. 1341–1345. – DOI:10.2136/sssaj1992.03615995005600050002x
121. **Davis J.L.** Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy / J.L. Davis, A.P. Annan // Geophysical Prospecting. – 1989. – № 37. – P. 531–551. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x
122. **De Loor G.P.** Dielectric properties of heterogeneous mixtures with a polar constituent // Applied Scientific Research, Section B. – 1964. – Vol. 11. – P. 310-320. – DOI: 10.1007/BF02922010
123. **Donohue S.** Geophysical and geotechnical assessment of a railway embankment failure / S. Donohue, K. Gavin, A. Tolooiyan // Near Surface Geophysics. – 2013. – Vol. 9. – № 1. – P. 33-44. – DOI: 10.3997/1873-0604.2010040
124. **Giroux B.** Quantitative analysis of water-content estimation errors using ground-penetrating radar data and a low-loss approximation / B. Giroux, M. Chouteau // Geophysics. – 2010. – Vol.75. – № 4. – P. 241-249. – DOI: 10.1190/1.3464329
125. **Glazounov V.V.** Complex solution of inverse problem GPR and VES based on the Pareto-optimality principle / V.V. Glazounov, N.N. Efimova, K.M. Ermokhine / European Association of Geoscientists & Engineers, 65th Conference and Exhibition. – Stavanger, Norway, 2003.

126. **Glazounov V.V.** The combined application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging for the investigation of sand-clay geological cross-section / V.V. Glazounov, D.A. Lalomov // Engineering Geophysics 2014 – 10th anniversary Scientific & Practical Conference and Exhibition. – Gelendzhik, Russia April 21 - 25, 2014. – DOI: 10.3997/2214-4609.20140359
127. **Griffin J.** HDD Industry receiving bad rap regarding accidents // Underground Construction. – 2001. – Vol. 56. – № 4. – P. 92.
128. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications** / edited by H.M. Jol. – Amsterdam: Elsevier Science, 2009. – 508 p. – ISBN: 0444533486 / 9780444533487
129. **Hagrey S.A.** GPR study of pore water content and salinity in sand / S.A. Hagrey, C. Muller // Geophysical Prospecting. – 2000. – №48. – P. 63-85 – DOI: 10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x
130. **Hallikainen M.T.** Microwave dielectric behaviour of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations / M.T. Hallikainen, F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes, L. Wu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – Vol. 23. – 1985. – P. 25-34. – DOI: 10.1109/TGRS.1985.289497
131. **Hayt W.** Engineering Electromagnetics / W. Hayt, J. Buck / McGraw-Hill Education, 2011. – 608 p. – ISBN: 0073380660 / 9780073380667
132. **Kaminsky A.E.** Modified Focusing Inversion of Electrical and TEM Data / A.E. Kaminsky, A.V. Tarasov / 2nd EAGE St Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences. European Association of Geoscientists & Engineers. – 2006. – P. 824-828. – ISBN: 978-1-62993-798-4
133. **Kiselev E.Yu.** Estimation of conductivity of the media using GPR data / Geophysics 2009, Session 4. European Association of Geoscientists & Engineers. – 2009.
134. **Khalil M.A.** An approach to estimate porosity and groundwater salinity by combined application of GPR and VES: a case study in the Nubian sandstone aquifer / M.A. Khalil, M.A. Hafez, F. Monteiro Santos, E.C. Ramalho, H.S.A. Mesbah, G.M. El-Qady // Near Surface Geophysics. – 2010. – Vol. 8. – № 3. – P. 223-233. – DOI: 10.3997/1873-0604.2010007
135. **Kuras O.** Fundamentals of the capacitive resistivity technique / O. Kuras, D. Beamish, P.I. Meldrum, R.D. Ogilvy // Geophysics. – 2006. – Vol. 71(3). – P. G135-G152. – DOI: 10.1190/1.2194892

136. **Lalomov D.A.** Using The Riskyproject software when calculating the risk approach based cost effectiveness of engineering-geophysical works / D.A. Lalomov, G.V. Kovalenko // *Theoretical & Applied Science*. – 2014. – Vol. 19 – № 11 – P. 16-19. – DOI: 10.15863/TAS.2014.11.19.4
137. **Lance J.D.** Development of an underground utility damage prevention plan (UUDPP) for Company XYZ: a research paper submitted for the master of science degree in risk control. – Menomonie, Wisconsin, USA: The Graduate College University of Wisconsin-Stout, 2008. – 134 p.
138. **Liu L.** Radar attenuation tomography using the centroid frequency downshift method / L. Liu, J.W. Lane, Y. Quan // *Journal of Applied Geophysics*. – 1998. – № 40. – P. 105-116. – DOI: 10.1016/S0926-9851(98)00024-X
139. **Loke M.H.** Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method / M.H. Loke, R.D. Barker // *Geophysical Prospecting*. – 1996. – №44 (1). – P. 131-152. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x
140. **Meissner T.** The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations / T. Meissner, F.J. Wentz // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004. – Vol.42. – № 9.– P. 1836-1849. – DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888
141. **Metropolis N.** The Monte Carlo method / N. Metropolis, S. Ulam // *Journal of the American Statistical Association*. – 1949. – Vol. 44. – № 247. – P. 335-341.
142. **Miyamoto Teruhito** Time Domain Reflectometry Calibration for Typical Upland Soils in Kyushu / Miyamoto Teruhito, Chikushi Jiro // *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*. – 2006. – Vol. 40. – № 3. – P. 225-231.
143. **Pascale G.P.** Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada / G.P. Pascale, W.H. Pollard, K.K. Williams // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2008. – Vol. 113. – DOI: 10.1029/2006JF000585
144. **Planning horizontal directional drilling for pipeline construction: guideline.** – Calgary, Canada: Canadian Association of Petroleum Producers, 2004. – 82 p.
145. **Risky project professional user guide.** – Calgary, Canada: Intaver Institute, 2012. – 186 p.
146. **Roth K.** Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach / K. Roth, R. Schulin, H. Flhler, W. Attinger // *Water Resources Research*. – 1990. – Vol. 26, – № 10. – P. 2267-2273. – DOI: 10.1029/WR026i010p02267

147. **Sabburg J.** Dielectric behaviour of moist swelling clay soils at microwave frequencies / J. Sabburg, J.A.R. Ball, N.H. Hancock // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1997. – Vol. 35. – № 3. – P. 785-787. – DOI: 10.1109/36.582002
148. **Savin V.A.** Electrical Resistivity Tomography and Electrocontact Dynamic Probing along the Railroad for Geotechnical Forecast / V.A. Savin, D.A. Lalomov, A.I. Artugin // Near Surface Geoscience 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Paris, 3-5 September 2012. – DOI: 10.3997/2214-4609.20143430
149. **Scheers B.** Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar, with Application to the Detection of Anti Personnel Landmine (Thesis (PhD)). – Brussels: Royal Military Academy (RMA), Dept. of Electricity and Telecommunications. – 2001.
150. **Schlumberger C.** Étude sur la prospection électrique du sous-sol (2e édition) / Paris, France: Gaultier-Villars et Cie, 1930. – 96 p.
151. **Sen P.N.** A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads / P.N. Sen, C. Scala, M.H. Cohen // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (5). – P. 781-795. – DOI: 10.1190/1.1441215
152. **Serra O.** Fundamentals of Well-Log Interpretation. Amsterdam: Elsevier, 1984. – 435p. – ISBN: 0-444-421 32-7
153. **Shen L.C.** Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies / L.C. Shen, W.C. Savre, J.M. Price, K. Athavale // Geophysics. – 1985. – Vol. 50 (4). – P. 692-704. – DOI: 10.1190/1.1441944
154. **Shevnin V.** Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data / V. Shevnin, O. Delgado-Rodriguez, A. Mousatov, A. Ryjov // Geofisica Internacional. – 2006. – Vol. 45. – № 3. – P. 195-207.
155. **Shevnin V.** Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, Mexico / V. Shevnin, O. Rodriguez, L. Linarez, H. Martinez, A. Mousatov, A. Ryjov // Geofisica Internacional. – 2005. – №44. – P. 251-263.
156. **Stoffa P.L.** Split-step Fourier migration / P.L. Stoffa, J.T. Fokkema, R.M. de Luna Freire, W.P. Kessinger // Geophysics. – 1990. – Vol. 55. – P. 410-421. – DOI: 10.1190/1.1442850
157. **Timofeev V.M.** A new ground resistivity method for engineering and environmental geophysics / V.M. Timofeev, A.W. Rodozinski, J.A. Hunter, M. Douma / 7th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – 1994. – P. 701-715. – DOI: 10.4133/1.2922099

158. **Tonn R.** The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods // Geophysical Prospecting. – 1991. – № 39. – P. 1-27. – DOI: 10.1111/j.1365-2478.1991.tb00298.x
159. **Topp G.C.** Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines / G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan // Water Resources Research. – 1980. – Vol. 16. – № 3. – P. 574–582. – DOI: 10.1029/WR016i003p00574
160. **Tronicke J.** GPR attribute analysis: There is more than amplitudes / J. Tronicke, U. Böniger // First break. – 2013. – №31. – P. 103-108.
161. **Turner G.** Constant Q attenuation of subsurface radar pulses / G. Turner, A.F. Siggins // Geophysics. – 1994. – Vol. 59. – № 8. – P. 1192-1200. – DOI: 10.1190/1.1443677
162. **Tzanis A.** MatGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data // FastTimes. – 2010. – Vol. 15(1). – P. 17-43.
163. **Ward S.H.** Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. Electro-magnetic Methods in Applied Geophysics. / S.H. Ward, G.H. Hohmann, ed. M.N. Nabighian. – Tulsa, Oklahoma (USA): SEG, 1988. – Vol. 1. – P. 130-311.
164. **Weiler K.W.** Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors / K.W. Weiler, T.S. Steenhuis, J. Boll, K.J.S. Kung // Soil Science Society of America Journal. – 1998. – Vol. 62. – P.1237-1239. – DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050013x
165. **Winsauer W.O.** Resistivity of Brine-Saturated Sands in Relation to Pore Geometry / W.O. Winsauer, H.M. Shearin, P.H. Masson, M. Williams // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 1952. – Vol. 32. – № 2. – P. 253-277.
166. **Wunderlich T.** Absorption and frequency shift of GPR signals in sandy and silty soils: empirical relations between quality factor Q, complex permittivity and clay and water contents / T. Wunderlich, W. Rabbel // Near Surface Geophysics. – 2013. – Vol.11. – № 2. – P. 117-127. – DOI: 10.3997/1873-0604.2012025