

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Санкт-Петербургский горный университет”

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Глазунов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

Шевнин Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук, ФГБОУ ВО “Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова”, кафедра геофизических методов исследования земной коры, профессор

Кулижников Александр Михайлович

доктор технических наук, профессор, ФАУ “Российский дорожный научно-исследовательский институт”, начальник Управления проектирования

Ведущая организация – ФГБОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный университет”

Защита диссертации состоится 28 июня 2017 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КИРЬЯКОВА
Ирина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. Финкель-штейн, А.А. Бобачев, И.Н. Модин, В.А. Шевнин, А.Е. Каминский, А.Р. Annan, J.L. Davis, J.D. Daniels, M. Vano, M.H. Loke, R.D. Barker, T. Dahlin, B. Zhou и многими другими. На сегодняшний же день, судя по многочисленным публикациям, происходит только усложнение аппаратурной 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 совокупном рассмотрении способен дополнять геофизический комплекс, тем самым позволяя 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. 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 ГРЛ и ЭТ 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.

Основные задачи работы:

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:

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

2. 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.

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

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

5. Теоретически и экспериментально обоснована возможность оценки фильтрационных свойств песков.

Практическая значимость:

1. 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.

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

3. 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.

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

5. 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.

6. 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 исследования. 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 и при непосредственном участии автора.

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, 11-й, 12-й, 13-й Международный геофизический научно-практический семинар “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых”. Санкт-Петербург: СПГУ, Горный университет, 2010, 2013, 2015, 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: СПГУ, 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 наименования), 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 сформулированы 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.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

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.

Защищаемое положение обосновывается результатами математического и физического моделирования и демонстрируется на примере исследования реальных инженерно-геологических разрезов.

Комплекс, включающий ЭТ и ГРЛ, является оптимальным для изучения верхней части геологического разреза. Каждый из этих методов характеризуется ограничениями, достоинствами и недостатками, но совокупное рассмотрение результатов позволяет синтезировать комплексную 2D ЭТ-ГРЛ модель, которая адекватно и с высокой степенью детальности отражает особенности строения геологического разреза.

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 удельного электрического сопротивления 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.

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 ϵ' и ϵ'' .

В качестве одного из примеров получения согласованной ЭТ-ГРЛ модели рассмотрим модель горизонтально-слоистой среды с контрастными электрофизическими параметрами ρ и ϵ' , геологическим аналогом которой может служить часто встречающаяся в инженерно-геологической практике ситуация, когда на гранитном основании залегают минеральное дно небольшой мощности, перекрытое торфяными отложениями (рисунок 1а). Результат 2D инверсии такой модели представлен на рисунке 1б. В силу влияния принципа эквивалентности полученная инверсионная модель лишь отдаленно напоминает прототип, и ее геологическая интерпретация без априорных данных была бы ошибочна. На рисунке 1в представлена георадиолокационная модель, а на рисунке 1г совмещенная ЭТ-ГРЛ модель, на которой данные ЭТ противоречат ГРЛ данным. Совместная ЭТ-ГРЛ модель, полученная с использованием фокусирующей инверсии по закрепленным георадиолокационным границам приведена на рисунке 1д.

Описанный пример, полученный на основе моделирования, наглядно иллюстрирует ситуацию, когда, казалось бы, противоречащие друг другу данные ГРЛ и ЭТ позволили синтезировать единую ЭТ-ГРЛ модель, которая адекватна геологическому разрезу. В соответствии с общепринятой терминологией данная модель является согласованной¹, так как за ее основу взята геометрия исследуемой среды, полученная по данным георадиолокации, а физическая характеристика, которой является УЭС, подобрана с учетом ее латеральной и вертикальной изменчивости.

На рисунке 2 приведены примеры согласованных ЭТ-ГРЛ моделей, полученных в рамках исследований различных реальных инженерно-геологических разрезов.

Обоснованием комплексирования методов георадиолокации и электротомографии является пространственная корреляция геоэлектрических структур и георадиолокационных границ, которые отражают изменения электрофизических параметров геолого-геофизических моделей.

Снижение эквивалентности электротомографической модели достигается на основе использования фокусирующей с учетом георадиолокационных границ инверсии. В концептуальной основе

¹ Никитин А.А. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов / А.А. Никитин, В.К. Хмелевской. – Тверь: ООО “Издательство ГЕРС”, 2004. – 294 с.

предложенного подхода к совместной обработке и интерпретации данных методов ГРЛ и ЭТ лежит установленная пространственная корреляция электротомографических структур и георадиолокационных границ. Описанные выше исследования подробно рассмотрены во **2 главе** диссертационной работы.

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

Водопроницаемость грунтов зависит от множества факторов, что не позволяет в точной аналитической форме выразить зависимость коэффициента фильтрации (K_f) от параметров того или иного грунта. Одним из основных факторов, влияющих на величину коэффициента фильтрации грунтов, является содержание глинистых частиц. Добавление к песку 10% глинистых частиц снижает водопроницаемость более чем на 50-60%.

Существует ряд зависимостей, связывающих коэффициент фильтрации с содержанием глинистых частиц. Для практических целей используется аппроксимация В.А. Шевнина²:

$$K_f = C^{-2} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}, \quad (1)$$

где K_f – коэффициент фильтрации; C – содержание глинистых частиц.

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. Несмотря на ряд ограничений для практического использования, обобщающей методикой определения коэффициента фильтрации на сегодняшний день является подход, основанный на измерениях УЭС грунта и минерализации грунтовых вод.

² 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.

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

Экспериментальные исследования, выполненные на двуслойной баковой модели (рисунок 3), в ходе которых были получены характеристики отраженных георадиолокационных сигналов в условиях различной минерализации воды и песка (рисунок 4), показали, что параметр добротности в меньшей степени, чем УЭС, чувствителен к изменению минерализации (рисунок 5).

Параметр Q определяет отношение запасенной энергии системы к потерям энергии за один период колебаний электромагнитной волны. Известно, что основной причиной затухания электромагнитной волны в грунте является увеличение содержания именно глинистой фракции.

Корреляционная зависимость между глинистостью и соотношением действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частями диэлектрической проницаемости³:

$$C = \sqrt[0.15]{\frac{\epsilon'' + 0.23}{0.19\epsilon'}}, \quad (2)$$

позволяет с учетом (1) получить зависимость, связывающую отношение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости с коэффициентом фильтрации:

$$K_f = \frac{1}{\sqrt[0.15]{\left(\frac{\epsilon'' + 0.23}{0.19\epsilon'}\right)^2}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}, \quad (3)$$

Зависимость (2), переработанная с учетом соотношения (1), для образцов с различными коэффициентами фильтрации приведена на рисунке 6.

Из рисунка 6а 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

³ 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.

коэффициента фильтрации – на ее мнимой части (ϵ''). Из рисунка бб следует, что при одинаковой влажности образцов большей добротностью Q будет обладать песок, коэффициент фильтрации которого будет больше.

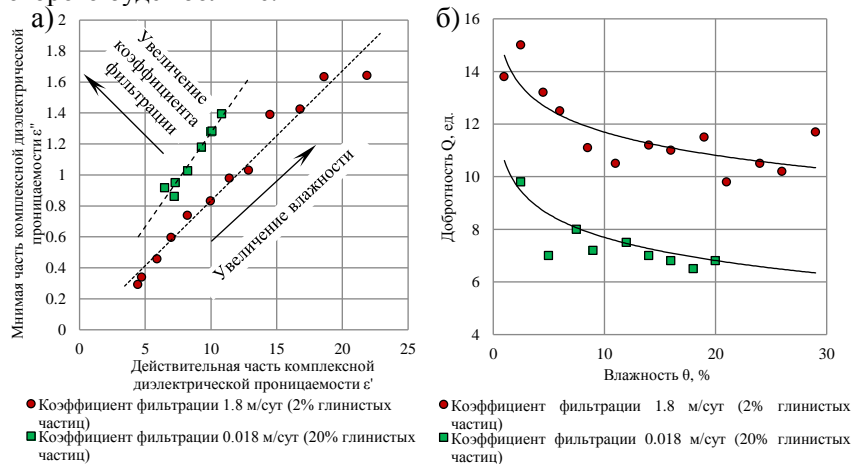


Рисунок 6 – а) соотношение мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') частей диэлектрической проницаемости в зависимости от коэффициента фильтрации; б) добротность в зависимости от влажности для образцов с различным коэффициентом фильтрации

Связь параметра добротности, электропроводности и действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости описывается следующими уравнениями:

$$\sigma_{ef} \approx \sigma_{DC} + \omega \epsilon'', \quad (4)$$

и

$$\epsilon_{ef} \approx \epsilon', \quad (5)$$

из которых следует⁴:

$$Q = \frac{\omega \epsilon_{ef}}{\sigma_{ef}} \approx \frac{\omega \epsilon'}{\sigma_{DC} + \omega \epsilon''}, \quad (6)$$

где ϵ_{ef} – эффективная диэлектрическая проницаемость, σ_{ef} – эффективная проводимость, ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости

⁴ 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.

соответственно, а σ_{DC} – электрическая проводимость постоянного тока. Учитывая, что угловая частота $\omega = 2\pi f$, удельное электрическое сопротивление $\rho = \frac{1}{\sigma_{DC}}$ и диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ из (6) получим

$$\epsilon'' \approx \frac{\epsilon'}{Q} - \frac{1}{\rho \cdot f \cdot 2\pi \cdot \epsilon_0}. \quad (7)$$

Тогда, подставив (7) в (3), получим формулу, пригодную для практических расчётов:

$$K_f \cong \frac{1}{\sqrt[0.15]{\left(\frac{\rho f 2\pi \epsilon_0 \epsilon' - Q + 0.23 Q \rho f 2\pi \epsilon_0}{Q \rho f 2\pi \epsilon_0 0.19 \epsilon'}\right)^2}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ [м/сут]}, \quad (8)$$

Преимуществом выражения (8) 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 выполнения расчетов по формуле (8) необходимо определить параметр добротности Q . Существует множество методов определения добротности Q , среди которых широко используются метод спектральных отношений и метод амплитудного спада⁵. В методе амплитудного спада, реализуемом во временной области, параметр добротности рассчитывается из отношения амплитуд сигналов, записанных до и после прохождения волны через поглощающую среду

$$Q = \frac{\omega \Delta x}{2V} \left\{ \ln \left[\frac{A(x_0)}{A(x_1)} \right] \right\}^{-1}, \quad (9)$$

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 $V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$, где c – скорость света в вакууме, ϵ' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, которая определяется на основании априорной геологической информации или данных георадиолокационного зондирования.

⁵ 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.

В случае двуслойной модели среды общая добротность модели и добротность первого слоя рассчитывается по формуле (9). Добротность второго слоя определяется с помощью выражения:

$$\bar{Q} \cdot \bar{h} = Q_1 \cdot h_1 + Q_2 \cdot h_2, \quad (10)$$

где \bar{Q} – эффективная (общая) добротность двуслойной 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 многослойных моделей используется аналогичный подход, при условии, что известны амплитуды отраженных сигналов, ограничивающие подошву и кровлю слоя, добротность которого нужно определить.

Таким образом, определение параметра добротности по известной методике на основе метода сопротивления и георадиолокации с использованием эмпирической зависимости (8), полученной на основе (1), (2) и (6), позволяет оценить коэффициент фильтрации песчано-глинистого грунта с использованием априорной информации о глубине расположения границ h_i .

Описанные выше исследования подробно рассмотрены в **3 главе** диссертационной работы.

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.

Защищаемое положение обосновывается практическими примерами успешной реализации комплекса ЭТ и ГРЛ на различных объектах транспортного строительства.

Исследование песчано-глинистых грунтов оснований инженерных сооружений. Рассмотрен пример выполнения геофизических исследований методами ЭТ и ГРЛ в рамках инженерных изысканий на участке строительства железнодорожной эстакады (рисунок 7). 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 (рисунок 8).

На следующем этапе выполняется расчет электрофизических параметров многослойного песчано-глинистого разреза на основе определения параметра добротности методом спектральных отношений по георадиолокационным данным (рисунки 9а и 9б). 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.

Исследование песчано-глинистых разрезов мерзлых насыпных грунтов. 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. Эффективность комплекса подтверждается математическим моделированием (рисунок 10).

В качестве примера рассмотрим результаты геофизического обследования одной из песчаных насыпей (рисунки 11а и 11б). 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.

На георадарограммах отражаются изменения степени уплотнения и состава песка, его криогенная текстура и льдистость, а также положение подошвы насыпи и наличие локальных неоднородностей (рисунки 11в и 11г).

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

Исследование дорожной одежды и земляного полотна. На рисунках 12а и 12б приведены результаты ГРЛ и ЭТ, полученные на автодороге. Метод георадиолокации характеризуется высокой

разрешающей способностью верхней части разреза, метод электротомографии, в свою очередь, обладает возможностью исследовать разрез на достаточно большую глубину. По данным георадиолокационного зондирования определена диэлектрическая проницаемость, и, тем самым, однозначно восстановлена геометрия разреза без привлечения дополнительной априорной информации (рисунки 13а и 14б). На рисунке 14 приведена согласованная ЭТ-ГРЛ интерпретационная модель автодороги.

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, которая, в свою очередь, контролирует значение коэффициента фильтрации и, как следствие, такой важный параметр, как влажность.

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 как построить согласованную ЭТ-ГРЛ интерпретационную модель автодороги, отражающую особенности ее геометрического строения, так и количественно охарактеризовать изменение ее состояния на основе электрофизических параметров, таких как добротность и УЭС.

Описанные выше исследования подробно рассмотрены в **4 главе** диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди основных решенных задач можно отметить теоретическое и практическое обоснование комплекса ЭТ и ГРЛ, системная реализация которого дает возможность получать согласованную геолого-геофизическую модель, характеризующуюся не только отсутствием противоречий внутри рассмотренного комплекса, 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 многолетне-мерзлых 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 ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России

1. **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.

2. **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.

3. **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.

4. **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.

5. **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.

6. 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.

В других изданиях

7. **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.

8. **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: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 2013. – С. 160-163.

9. **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.

10. 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.

11. 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.

12. 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” Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 2015. – С. 156-158.

13. 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.

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.

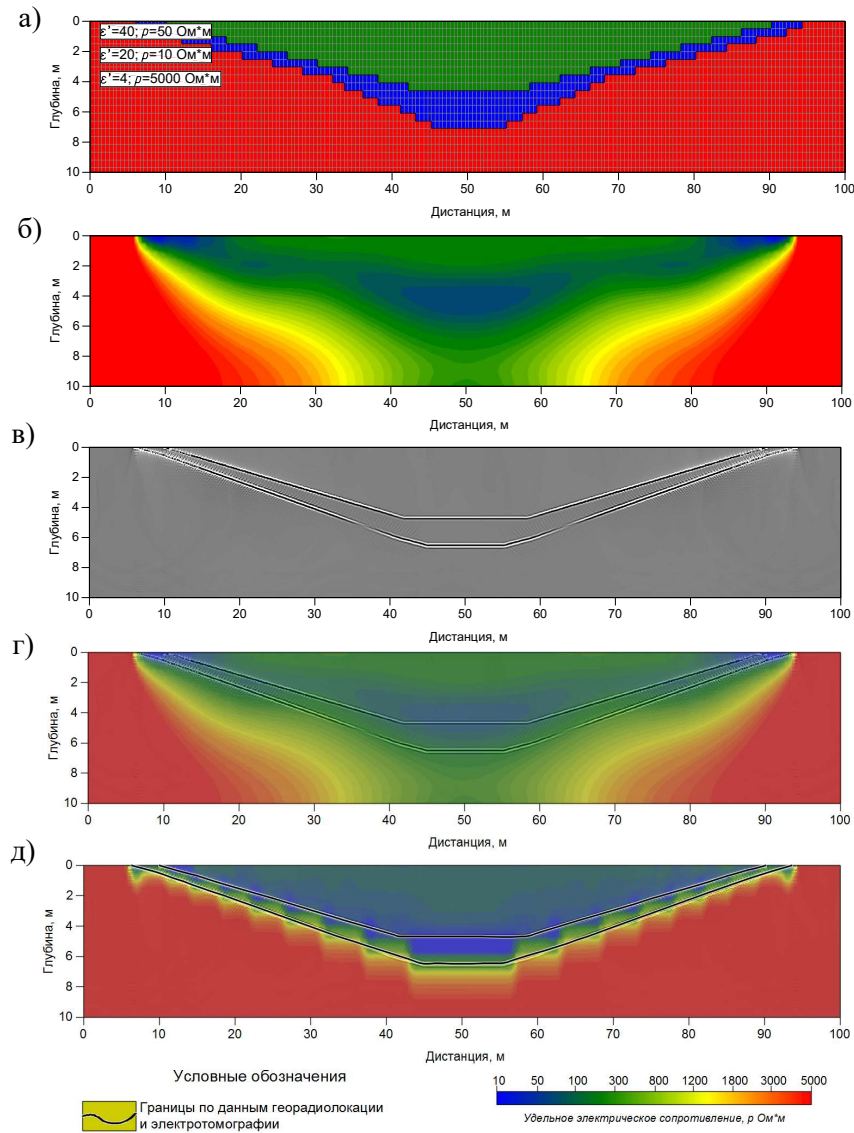


Рисунок 1 – а) стартовая модель; б) инверсионная ЭТ модель; в) ГРЛ модель; г) совмещенная ЭТ-ГРЛ модель; д) согласованная ЭТ-ГРЛ модель

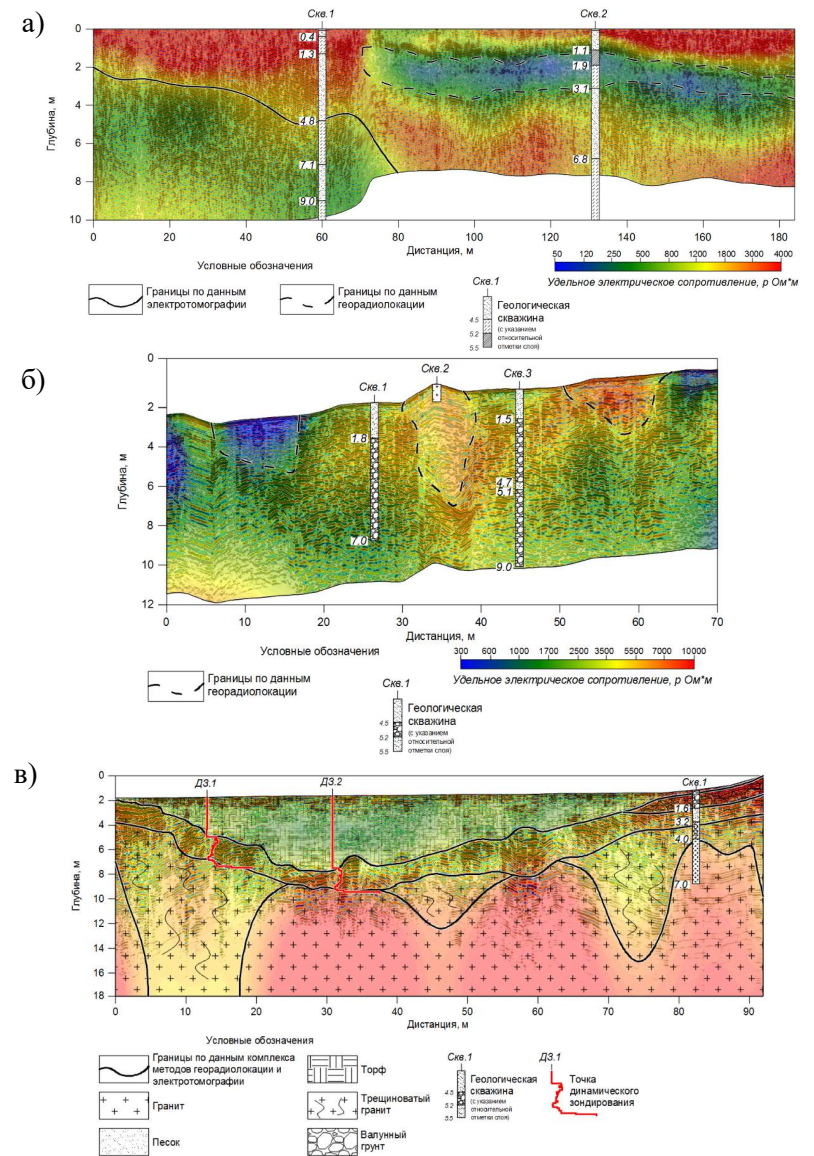


Рисунок 2 – Примеры согласованных ЭТ-ГРЛ моделей: а) песчано-глинистый разрез; б) песчано-глинистый разрез с гравием, галькой и валунами; в) разрез отложений торфа, залегающих на гранитном основании различной степени трещиноватости

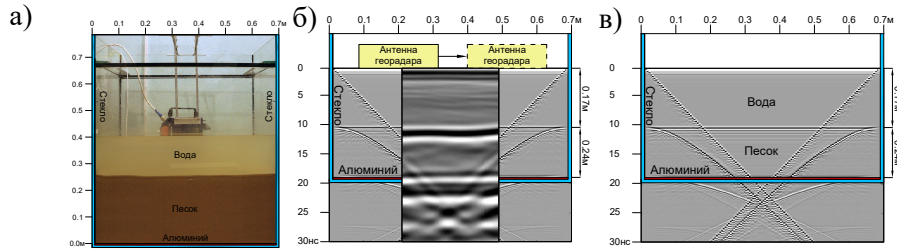


Рисунок 3 – а) Двухслойная физическая баковая модель; экспериментальная (б) и теоретическая (в) георадарограммы двуслойного разреза баковой модели

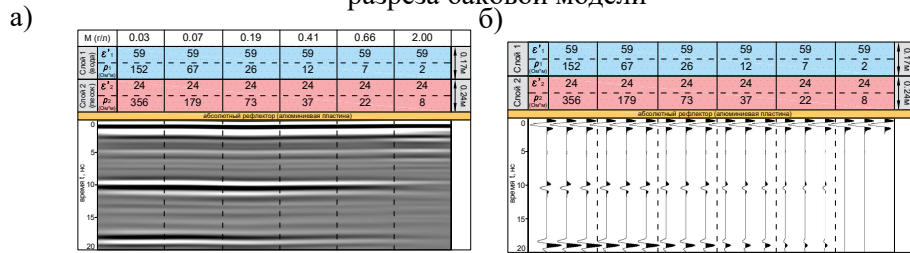


Рисунок 4 – ГРЛ модели двуслойной среды с различными значениями диэлектрической проницаемости и УЭС: а) экспериментальная; б) синтетическая

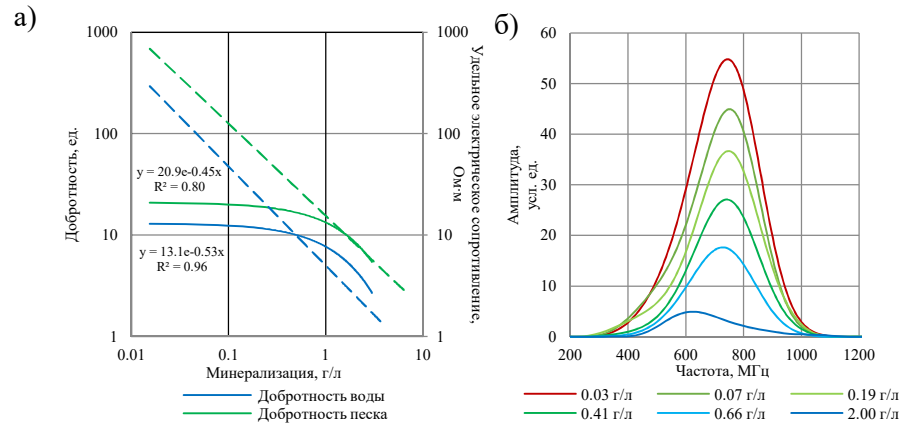


Рисунок 5 – а) графики зависимости удельного электрического сопротивления и добротности от минерализации; б) спектры отраженных сигналов от границы вода-песок

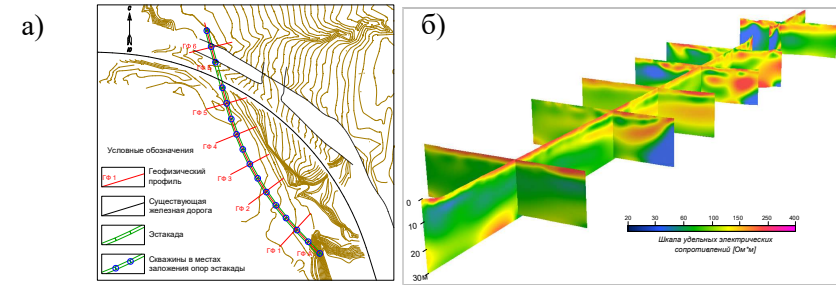


Рисунок 7 – а) схема расположения геофизических профилей; б) трехмерное представление результатов геофизических исследований (ЭТ разрезы получены с учетом данных ГРЛ)

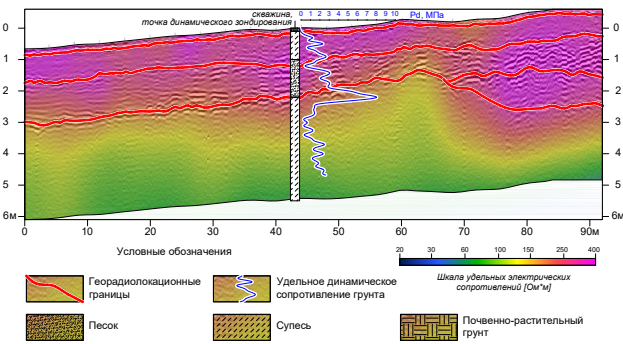


Рисунок 8 – Комплексная ЭТ-ГРЛ модель

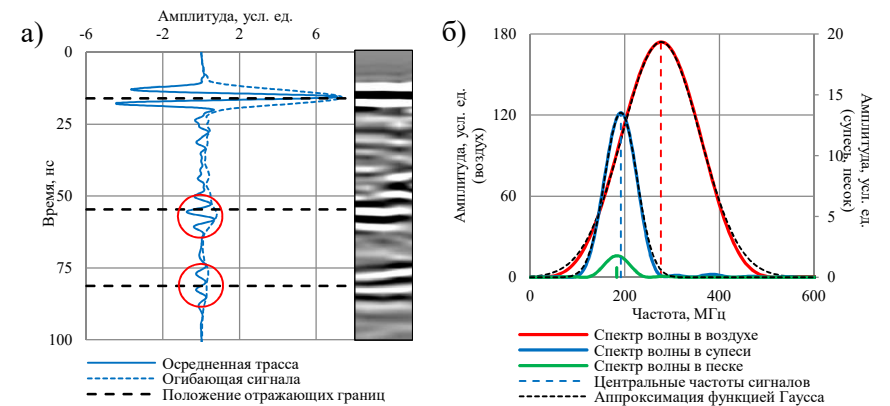


Рисунок 9 – а) осредненная трасса; б) частотные спектры отраженных сигналов в сравнении со спектром прямой волны в воздухе

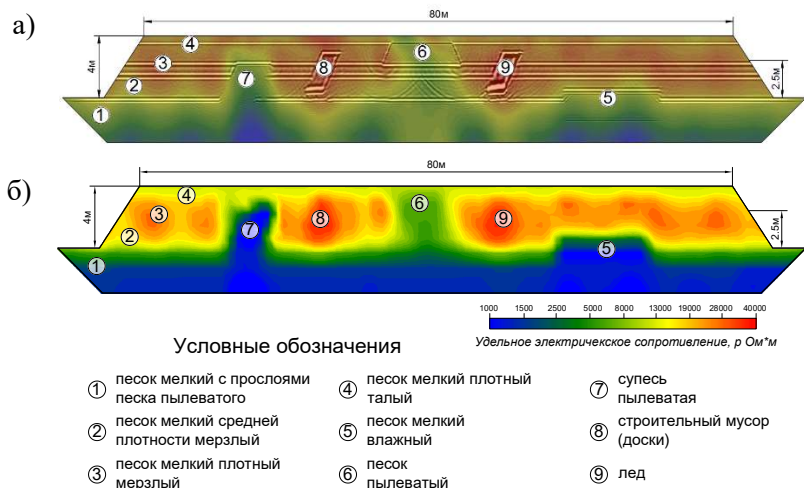


Рисунок 10 – а) совмещенная и б) совместная ЭТ-ГРЛ модель неоднородной песчаной насыпи

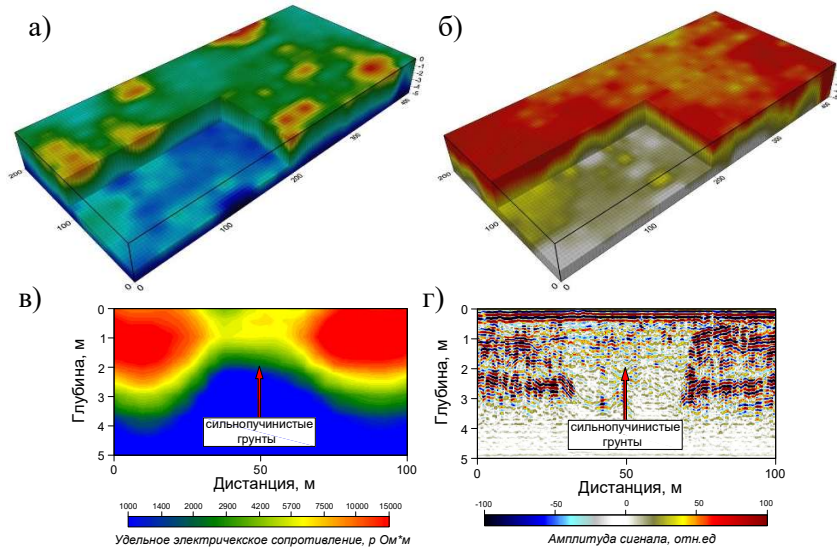


Рисунок 11 – а) ЭТ модель и б) ГРЛ модель песчаной насыпи; отражение сильнопучинистых грунтов в геофизических данных: (v) ЭТ разрез; (г) ГРЛ разрез

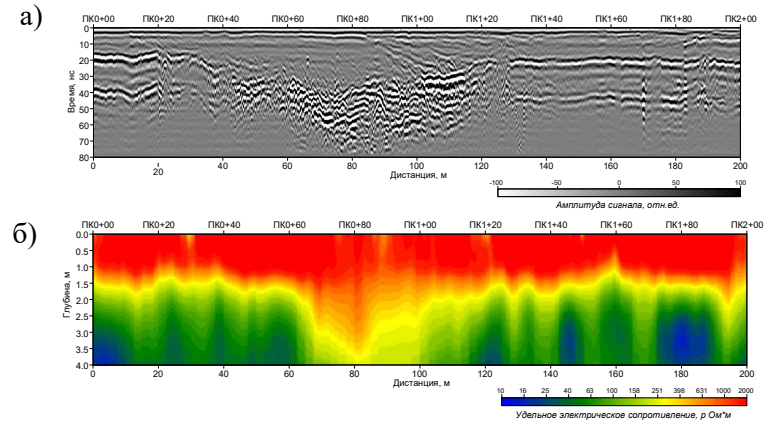


Рисунок 12 – а) георадиолокационный и б) электротомографический разрез автодороги

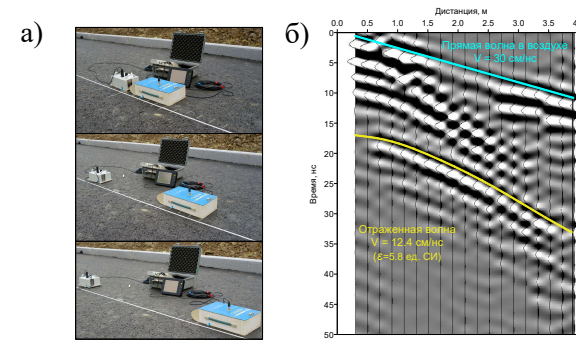


Рисунок 13 – а) пример выполнения ГРЛ зондирования; б) ансамбль трасс ГРЛ зондирования с выделенными годографами прямой и отраженной волны

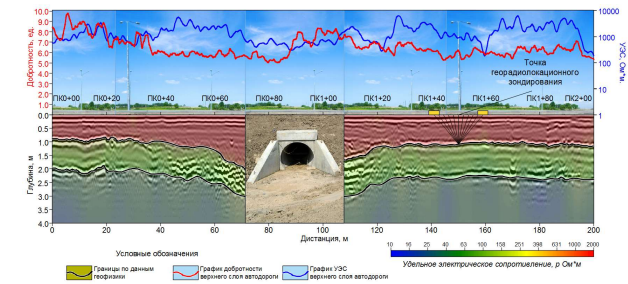


Рисунок 14 – Пример комплексного ЭТ-ГРЛ разреза автодороги