

На правах рукописи



Филимончиков Александр Алексеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Пермский государственный национальный исследовательский университет на кафедре геофизики геологического факультета.

Научный руководитель: **Костицын Владимир Ильич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики геологического факультета ФГАОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет.

Официальные оппоненты: **Шевнин Владимир Алексеевич,**
доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

Ратушняк Александр Николаевич,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией электрометрии ФГБУН Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН.

Ведущая организация: **Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН ПФИЦ УрО РАН (ГИ УрО РАН), г. Пермь**

Защита диссертации состоится в **10 часов 31 марта 2022 года** на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, г. Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «___» февраля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Рациональное и безопасное освоение минерально-сырьевой базы неразрывно связано с оценкой инженерно-геологических условий по средствам проведения инженерных изысканий. В состав изысканий входят инженерно-геофизические исследования, среди которых большое значение, согласно нормативным документам, имеют методы электрометрии постоянного тока. Методы электрометрии являются одним из инструментов оценки инженерно-геологических условий, воспроизводства минерально-сырьевой базы, проектирования оптимального и безопасного освоения месторождений полезных ископаемых с учетом требований рационального недропользования.

Одними из наиболее актуальных и требующих изучения направлений прикладной электрометрии при безопасном и рациональном освоении месторождений углеводородного сырья являются геофизические исследования водных переходов, определение удельных электрических сопротивлений и петрофизических характеристик дисперсных грунтов, определение величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений.

Значительный вклад в изучение перечисленных направлений внесли В.Н. Дахнов, В.К. Хмелевской, А.А. Огильви, Б.К. Матвеев, М.И. Эпов, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, В.П. Колесников, А.В. Татаркин, К.В. Титов, В.В. Глазунов, Б.В. Боровский, И.А. Санфиров, А.А. Редозубов, А.А. Рыжов, А.А. Бобачев, А.Н. Ратушняк, Ю.И. Степанов, М.Н. Loke, Т. Dahlin, В. Zhou, А.Е. Каминский, Н.Б. Дортман, Ю.Д. Зыков, С.М. Простов, Н.М. Васильев, В.В. Капустин, Г.И. Квятковский, В.Н. Кобранова, Р. Dong, Ф. Фрич и др.

Актуальность рассматриваемых в диссертации материалов обусловлена необходимостью совершенствования существующих технологий, методик и способов лабораторного измерения полей постоянного тока применительно к сложным геологическим, климатическим и технико-экономическим условиям, в которых исследования прямыми методами затруднены или невозможны.

Основная идея исследований

Изучение структуры и вещественного состава верхней части земной коры по средствам размещения установок наблюдения во внутренних точках геологической среды для повышения достоверности оценки инженерно-геологических условий с целью рационального и безопасного недропользования.

Цель работы

Разработка технологии электрометрии на постоянном токе из трех взаимосвязанных методик исследований для оценки инженерно-геологических условий, направленной на обеспечение рационального и безопасного недропользования.

Основные задачи исследований

1. Разработка методики уточнения инженерно-геологических условий на участках переходов линейных инженерных сооружений через водные преграды методами электрометрии постоянного тока.

2. Теоретическое обоснование и совершенствование методики лабораторного измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) образцов дисперсных грунтов.

3. Теоретическое обоснование и разработка методики определения величины заглубленной части фундаментов инженерных сооружений, основанной на скважинных измерениях методами постоянного тока.

4. Апробация и применение разработанной технологии электрометрии для обеспечения рационального и безопасного недропользования.

Основные защищаемые положения

1. Методика исследования водных переходов, основанная на результатах электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность исследований [5, 6, 9, 11, 13, 14].

2. Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов, основанная на результатах исследований влияния их геометрических размеров, позволяющая определять УЭС и петрофизические характеристики парафинированных монолитов и рядовых проб разных размеров в полевых и лабораторных условиях [2, 7, 10, 12, 13].

3. Методика определения величины заглубленной части фундаментов, основанная на скважинных измерениях электрического поля постоянного тока, позволяющая определять геометрические характеристики конструкций инженерных сооружений в условиях невозможности исследования прямыми методами [1, 3, 4, 6, 8, 12].

Научная новизна

1. Установлено, что донные измерения методами электрометрии постоянного тока повышают разрешающую способность, глубинность наблюдений и рекомендуются для изучения тонкослоистого разреза донных отложений при малоглубинных исследованиях акваторий. Определены преимущества использования донных электрометрических наблюдений в зимний период времени. Разработана методика уточнения инженерно-геологических условий методами электрометрии на участках переходов линейных инженерных сооружений через водные преграды.

2. Установлены зависимости удельного электрического сопротивления от размеров литологических образцов правильной формы. Изучено влияние микроанизотропии на результаты измерений удельного электрического сопротивления малоразмерных образцов дисперсных грунтов. Предложена экспресс методика определения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов.

3. Дано теоретическое обоснование возможности использования скважинных методов электрометрии постоянного тока для определения величины заглубленной части и геометрических характеристик фундаментов инженерных сооружений. По результатам численного и физического моделирования установлены интерпретационные критерии, разработана методика для определения заглубленной части фундаментов в однородной и слоистой средах.

Практическая значимость исследований

1. Разработанная методика акваториальных измерений позволяет повысить детальность, глубинность и оперативность геологических исследований за счет стадийности наблюдений. Применение методики при геологических исследованиях позволило получить данные о строении участков переходов линейных инженерных сооружений транспортной инфраструктуры осваиваемых месторождений углеводородного сырья через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору, Харьягу.

2. Получены распределения удельных электрических сопротивлений основных типов дисперсных грунтов для Пермского края, Республики Коми и Тюменской области. На основании представленных петрофизических зависимостей оценена перспективность использования в качестве строительных материалов грунтов семи нефтяных месторождений Западной Сибири: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямынского, им. Малыка, Западно-Эпасского.

3. Разработаны интерпретационные критерии, представленные системой соответствующих максимумов параметров электрического поля, которые опробованы при определении величины заглубленной части фундаментов инженерных сооружений нефтяной инфраструктуры на одной из промышленных площадок ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

Основные методы исследований

1. Численное и физическое моделирование полей постоянного тока.
2. Эксперименты и натурные электрометрические наблюдения.
3. Лабораторные исследования удельного электрического сопротивления монолитов и рядовых проб дисперсных грунтов.
4. Корреляционный анализ результатов наблюдений.

Применимость технологии

Первоочередными объектами исследований технологии электрометрии являются участки водных переходов линейных сооружений, где рассматриваемые методики применяются совместно для проектирования инфраструктуры месторождений углеводородного сырья. Отдельные части технологии – две последние методики – могут самостоятельно применяться при поиске месторождений грунтовых строительных материалов и оценке величины заглубленной части фундаментов сооружений. В широком понимании предлагаемая технология состоит из взаимосвязанных методик исследований и направлена на повышение достоверности оценки инженерно-геологических условий для обеспечения рационального и безопасного освоения недр.

Реализация результатов исследований

Реализация результатов научно-исследовательской деятельности выполнена в ходе опытно-методических и производственных работ в Научно-исследовательском проектно и производственном предприятии по природоохранной деятельности ООО НИПППД «Недра» при проектировании обустройства нефтяных месторождений в Пермском крае, Республике Коми, Республике Саха (Якутии) и поиске перспективных месторождений грунтов в Тюменской области. Исследования выполнялись для предприятий

ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО "ЛУКОЙЛ-Коми", ПАО «ЛУКОЙЛ»,
ПАО «Транснефть», ПАО «НК Роснефть», ООО «НК Роснефть-НТЦ»,
ООО «ТНК-УВАТ».

В период преподавания на кафедре геофизики ПГНИУ, результаты исследований использованы в качестве обучающих материалов курса «Электроразведка».

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в теоретическом обосновании, разработке и практическом применении технологии электрометрии. Осуществлял прогнозирование и определение необходимых интерпретационных критериев с помощью численного и физического моделирования. Выполнял апробацию представленных методик исследования в ходе опытно-методических работ на предприятия ООО НИПППД «Недра» по средствам проведения экспериментов, натурных наблюдений, лабораторных измерений. Принимал участие в получении материалов, необходимых для проектирования обустройства, рационального и безопасного освоения месторождений полезных ископаемых.

Публикации и апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 14 публикациях, из них 2 – в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science, 6 статей – в журналах из перечня ВАК. Основные положения и результаты исследований докладывались на 7 всероссийских и международных конференциях: V научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2012, 2014); XI международном геофизическом научно-практическом семинаре «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2013); XXII международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2014); XIX Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2018), международной научно-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (Пермь, 2017, 2020).

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю – заведующему кафедрой геофизики ПГНИУ, д.т.н., профессору В.И. Костицыну. Автор признателен д.т.н., профессору В.П. Колесникову, д.т.н. А.В. Татаркину за идеи, направление в научной деятельности, ценные советы и всевозможную поддержку. Автор благодарит генерального директора ООО НИПППД «Недра», д.г.-м.н., профессора В.В. Середина; д.т.н., профессора кафедры геофизики ПГНИУ В.А. Гершанoka; а также д.г.-м.н., профессора кафедры геофизики «Института наук о Земле» СПбГУ К.В. Титова за консультации и важные замечания. Особую благодарность автор выражает коллективу отдела геофизических исследований и лаборатории ООО НИПППД «Недра» за всестороннюю помощь и поддержку.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Изложена на 161 странице машинописного текста, включает 67 рисунков, 12 таблиц и содержит список литературы из 100 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА I

Методика уточнения инженерно-геологических условий на участках переходов инженерных сооружений через водные преграды методами электрометрии

В главе I приводится обоснование первого защищаемого положения: *«Методика исследования водных переходов, основанная на результатах электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность исследований»* [5, 6, 9, 11, 13, 14].

Выполнен анализ информации по применению методов электрометрии постоянного тока для исследования акваторий. Современные тенденции заключаются в применении электротомографии и комплексировании ее с другими геофизическими методами (М.Н. Лок, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, В.В. Глазунов, М.И. Эпов, Б.В. Боровский, А.А. Бобачев, Т. Dahlin, В. Zhou, А.Е. Каминский). Применение детальных томографических наблюдений может быть ограничено техническими, экономическими, климатическими и геологическими условиями. В таких ограниченных условиях при исследовании малоглубинных акваторий целесообразно применение донных наблюдений методом ВЭЗ по защищаемой методике.

Предлагаемая методика имеет следующую стадийность исследований:

1. Проведение наземных наблюдений методом ВЭЗ по берегам акватории.
2. Проведение акваториальных наблюдений методом ВЭЗ в русловой части со дна и с поверхности водоема. При выполнении измерений установки зондирования размещаются параллельно линии уреза воды (поперек линии профиля), что позволяет снизить влияние рельефа дна и неоднородностей разреза.
3. Батиметрия, термометрия и резистивиметрия водной толщи для определения рельефа дна и минерализации воды.
4. Введение в полевые материалы на этапе обработки соответствующих поправок за влияние водного слоя.
5. Автоматическая экспресс интерпретация данных ВЭЗ с применением алгоритма 3D инверсии. Применение направлено на увеличение оперативности исследований и позволяет в автоматическом режиме учесть ориентацию установки наблюдения параллельно линии уреза воды (поперек линии профиля), а также возможные изменения рельефа дна по результатам батиметрии.
6. Постановка буровых работ.
7. Построение окончательной геоэлектрической модели среды в системе 1D интерпретации [13].

Апробация и верификация предлагаемой методики показана на примере материалов геофизических исследований водного перехода через р. Яйву в зимний период времени. Решались следующие задачи: выявление особенностей строения геологического разреза; уточнение свойств и прослеживание литологических границ в межскважинном пространстве; изучение морфологии дна; локация продуктопровода в пространстве; определение характеристик, необходимых для проектирования электрохимической защиты.

Предварительно с помощью численного моделирования изучено влияние водной толщи, выполнена оценка точности определения количественных характеристик геоэлектрической среды при применении донных и поверхностных наблюдений.

На этапе полевых работ наблюдения выполнены методом вертикального электрического зондирования согласно представленной методике исследований. На этапе контроля качества полевого материала проведен сравнительный анализ кривых кажущегося сопротивления (КС) с поверхности и со дна водоема. Установлено расхождение левых ветвей кривых вследствие влияния льда и водной толщи на результаты наблюдений. Ключевым моментом является дифференцированный характер кривой со дна, на которой отчетливее проявляются особенности разреза, связанные с вертикальной изменчивостью литологии придонных отложений (рис. 1, а, б, в).

Для постановки буровых работ в русле реки выполнена экспресс количественная интерпретации в программе ZondRez3D (А.Е. Каминский). Входными данными являлось поле кажущихся сопротивлений со дна реки, рассчитанное для условий полупространства, а также значения мощности водного слоя и его сопротивление. Первые представления о строении геологического разреза в русловой части получены из результатов береговых исследований.

При автоматической инверсии данных донных наблюдений обнаруживается занижение значений УЭС русловых отложений до глубины 2-3 м, что не согласуется с представлениями о геологическом строении участка исследований и материалами поверхностных измерений. Несмотря на то, что значения кажущихся сопротивлений имеют привязку ко дну водоема, при расчете кривых со дна предварительно необходимо корректировать коэффициент установки для учета влияния вышележащего слоя воды.

На основе результатов первичной количественной интерпретации (рис. 1, г) выполнена постановка буровых работ.

Следующим этапом истолкования стало построение окончательной геоэлектрической модели среды в системе 1D интерпретации «Зонд» (В.П. Колесников и др.) с учетом данных бурения (рис. 1, в, д).

На основании полученной геоэлектрической модели среды выполнено заверочное бурение для подтверждения залегания песчаников на пикете 4д, проведено прослеживание границ инженерно-геологических элементов, уточнение электрических свойств прирусловых отложений.

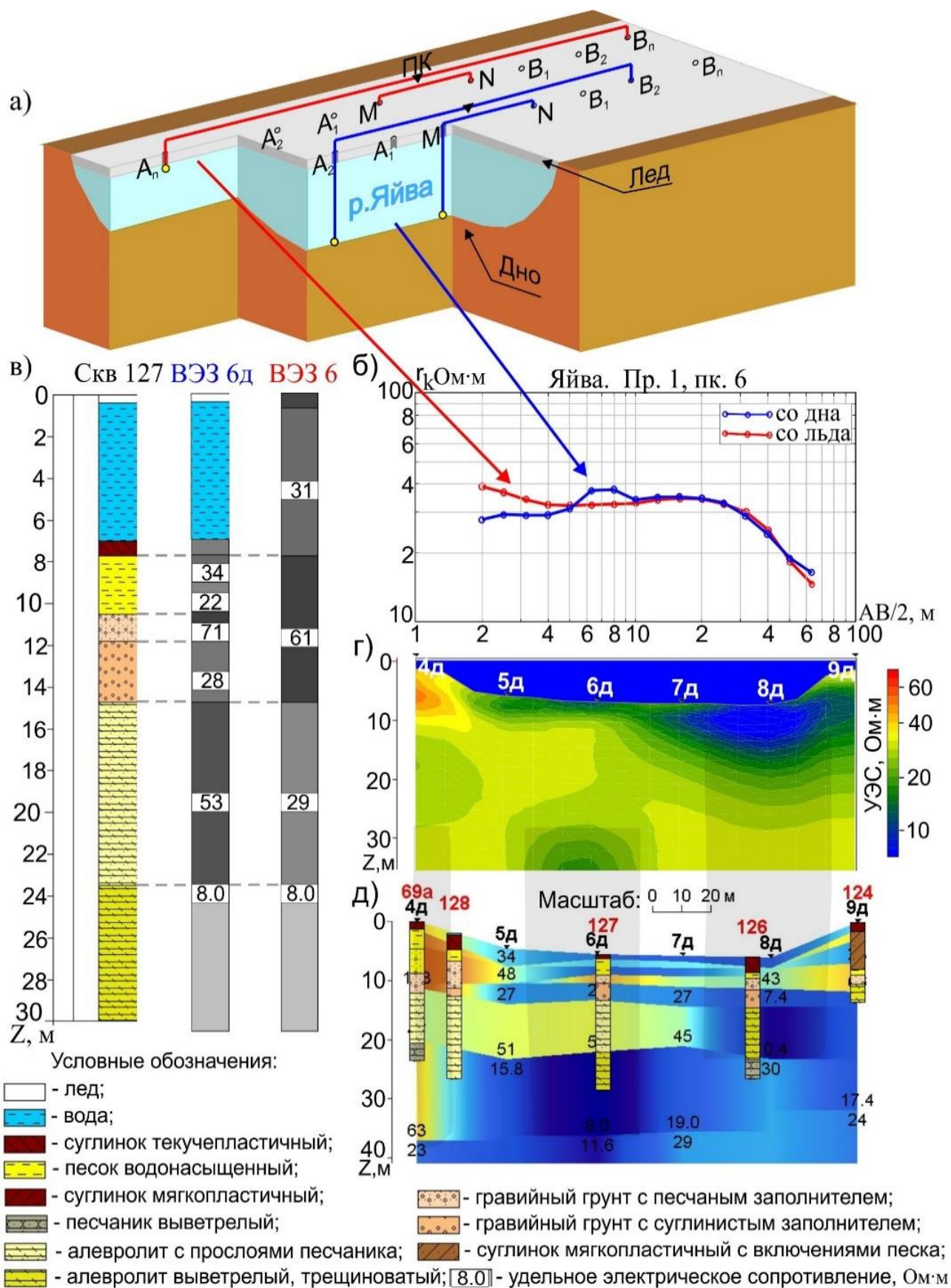


Рисунок 1. Результаты исследования водного перехода через реку Яйву: а – схема выполнения зондирований, б – кривые КС, в – результаты параметрического анализа, г, д – геоэлектрический разрез по данным автоматической и 1D инверсии ВЭЗ

На последнем этапе исследований выполнен сравнительный анализ данных бурения с результатами автоматической и 1D инверсии поверхностных и донных наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

*Сравнительный анализ результатов интерпретации ВЭЗ
с данными заверочного бурения (на примере скважины № 127)*

Скважина №127			Погрешность определения глубины кровли ИГЭ (δН, %)		
№ ИГЭ*	Глубина кровли, м	Мощность, м	1D	1D	Автоматическая инверсия
			Со льда	Со дна	
2р	7	0.7	Интегральный слой с «водной толщей»	0	0
5	7.7	2.8	Интегральный слой повышенного сопротивления	1	4
6р	10.5	1.3		0	Интегральный слой повышенного сопротивления
6	11.8	2.9		0.8	
7р	14.7	8.8	1.4	0.7	
7	23.5	-	1.3	0	15

* – инженерно-геологический элемент

Результаты сравнительного анализа позволили сделать следующие выводы:

1. Применение донных наблюдений за счет размещения измерительной установки во внутренних точках среды повышает степень дифференциации при выделении особенностей строения и свойств геологического разреза, позволяет точнее определять количественные характеристики геоэлектрических горизонтов, повышает глубинность акваториальных геофизических исследований.

2. Преимущество использования программы 3D инверсии при экспресс интерпретации акваториальных данных ВЭЗ заключается в автоматизации процесса построения трехмерной электрической модели среды без априорной информации. Это является достаточным для прогноза изменений в геологическом разрезе с целью оперативной постановки буровых работ при инженерно-геологических изысканиях.

3. Модель среды, восстановленная при автоматической инверсии, имеет более интегральный характер по сравнению с результатами одномерной интерпретации, поэтому на этапе построения окончательной тонкослоистой геологической модели рекомендуется применение программ 1D инверсии.

4. Погрешность определения глубин по данным ВЭЗ в сравнении с результатами заверочного бурения изменяется от единиц до первых десятков процентов. Наблюдения со дна реки при сопоставлении с поверхностными измерениями обладают большей разрешающей способностью и меньшей погрешностью определения границ инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Для прогнозирования особенностей строения геологического разреза необходимо дополнять донные исследования наблюдениями с поверхности акватории, что позволяет осуществлять контроль получаемой информации и является одним из способов повышения детальности исследований.

5. Области изменения удельного электрического сопротивления грунтов, выделенные в ходе геофизических исследований, подтверждаются результатами бурения в виде изменения вещественного состава и свойств русловых отложений. В случае сложных геологических условий необходимо учитывать дополнительный объем бурения для заверки аномальных значений геофизических параметров.

6. Ключевым моментом в успехе инженерно-геологических изысканий является их стадийность, оправдывающая проведение геофизических исследований на стадии, предшествующей постановке буровых работ. Опережение буровых работ служит одним из путей оптимизации геологических исследований.

Полученные выводы являются основой первого защищаемого положения. Предложенная методика была апробирована и внедрена в ООО НИПППД «Недра» при исследовании водных переходов через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору и Харьгу.

ГЛАВА II

Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов

В главе II приводится обоснование второго защищаемого положения: *«Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов, основанная на результатах исследований влияния их геометрических размеров, позволяющая определять УЭС и петрофизические характеристики парафинированных монолитов и рядовых проб разных размеров в полевых и лабораторных условиях»* [7, 10, 12, 13].

Выполнен анализ существующих методик лабораторного измерения электрических свойств грунтов, основанных на использовании различных двух-четырёхэлектродных установок, измерительных ячеек и кернодержателей (В.Н. Дахнов, Н.Б. Дортман, В.Н. Кобранова, А.А. Редозубов, К.В. Титов, А.Н. Ратушняк). Предложена методика с использованием микроустановки Шлюмберже, преимуществом которой является более оперативное измерение УЭС образцов произвольных размеров без нарушения их герметичности и сплошности.

Для измерений применяется серийная электроразведочная аппаратура, используемая при выполнении исследований на постоянном токе и четырёхэлектродная микроустановка AMNB с разносом питающей линии 5 см. Длина установки выбрана из расчета наиболее встречаемых размеров проб. Электроды смонтированы на многопиновом разъеме типа BLD в виде съемных штырей, которые легко проходят через парафин или защитную пленку образца (рис. 2, а, б).

В середине XX века установка Шлюмберже использовалась для относительного измерения УЭС образцов неправильной формы (Ф. Фрич, 1965). Поскольку на практике пробы дисперсных грунтов имеют форму цилиндра, куба или параллелепипеда, с помощью моделирования изучено влияние геометрических размеров образца правильной формы на результаты измерений.

Численное моделирование выполнено в программе «ZondRes3D». Измерительная установка AMNB располагалась в центре на поверхности модели образца с заданным УЭС, параллельно оси X, по которой откладывалось значение длины образца, по осям Y и Z – соответственно, ширины и высоты. Над полученной трехмерной моделью рассчитывалось значение кажущегося сопротивления. Затем геометрические размеры изменялись и вычисления повторялись. В итоге прямая задача решена для более 800 моделей с соответствующими размерами.

По рассчитанным значениям КС определено отклонение измеряемого значения сопротивления от заданного сопротивления образца

$$\sigma = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ρ_1 – сопротивление, рассчитанное на поверхности образца по результатам численного моделирования, ρ_2 – заданное сопротивление образца.

Вычисленные отклонения измеряемых значений визуализированы в качестве трехмерной зависимости в системе программ «Зонд». Для удобства использования по осям отложены отношения длины (L), ширины (D) и высоты (H) образца к величине разноса АВ измерительной установки (рис. 2, в). Сечения куба позволяют найти отклонение измеряемого УЭС для образцов правильной формы и соответствующих геометрических размеров. Например, в практике инженерно-геологических изысканий наиболее часто встречаются малоразмерные рядовые пробы, которые имеют форму параллелепипеда, и полноразмерные образцы керна с диаметром около 10 см. Используя полученную зависимость, можно оценить отклонение сопротивления для проб различных размеров.

На основании массива вычисленных данных изучена зависимость отклонения измеряемого сопротивления от объема образца. Как и предполагалось, отклонение тем больше, чем меньше его объем. Показано, что одному значению объема при различном соотношении длины, ширины и высоты образца могут соответствовать различные отклонения.

Заверка и уточнение полученных данных проведены в ходе физического моделирования. Выполнены наблюдения с микроустановкой AMNB на образцах при естественной влажности с последовательным изменением их геометрических размеров. По результатам физического моделирования построено распределение отклонений измеряемого УЭС, в зависимости от геометрических размеров образца с равной шириной и высотой ($D = H$, рис. 2, г), а также кривые зависимости отклонения от объема. Определено, что при использовании установки длиной 5 см и образцов, имеющих размеры менее 8 см в длину, 6 см в высоту и ширину, необходимо введение соответствующих поправок к измеренным значениям. В остальных случаях отклонения находятся в пределах погрешности измерений.

С помощью моделирования также исследован вопрос влияния микроанизотропии на результаты измерений. Выявлено, что при определении УЭС образцов, близких по составу к однородным, результат больше зависит от

ограниченного объема, а анизотропия оказывает влияние в рамках погрешности полевых наблюдений. Это позволяет проводить измерения вдоль пробы керна.

Методика апробирована при выполнении натурных измерений на образцах в полевых и лабораторных условиях в рамках геологических исследований, проводимых ООО НИПППД «Недра» в Пермском крае, Республике Коми, Тюменской области, Республике Саха (Якутии). Распределения УЭС некоторых грунтов Пермского края и Республики Коми изображены на рисунке 2, д.

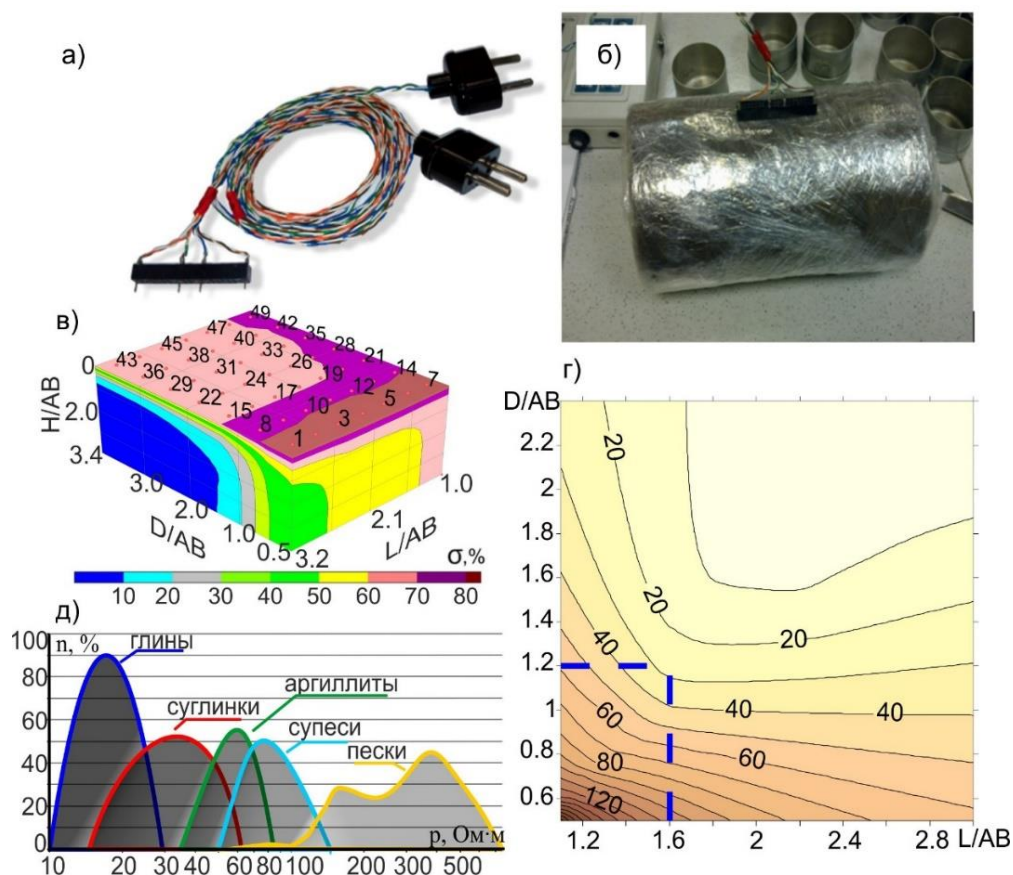


Рисунок 2. Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов: а – внешний вид микроустановки Шлюмберже, б – проведение измерений на образце керна, в, г – зависимости по результатам численного и физического моделирования, д – распределения УЭС некоторых грунтов Пермского края и Республики Коми

В рамках петрофизического подхода определение зависимости УЭС от литологического состава и общезфизических свойств в лабораторных условиях необходимо для уточнения физико-геологических моделей на этапе истолкования геофизических данных (В.Н. Дахнов, В.К. Хмелевской, А.А. Огильви, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.А. Рыжов, Б.К. Матвеев, Н.Б. Дортман, Ю.Д. Зыков).

Результаты исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Предложена усовершенствованная методика определения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов, основанная на использовании микроустановки Шлюмберже.

2. Выполнено теоретическое обоснование рассматриваемой методики. По результатам моделирования установлены зависимости отклонения измеряемого УЭС от геометрических размеров образцов, являющиеся методической погрешностью.

3. Предлагаемая методика позволяет проводить измерения на образцах правильной формы произвольных размеров с сохранением их герметичности и сплошности в более близких к естественным (в сравнении с применением других методик измерений) условиях влагонасыщения; существенно сократить трудозатраты и потерю времени на подготовку образцов при измерениях как в полевых, так и в лабораторных условиях.

4. Апробирование методики выполнено в рамках геологических исследований при определении УЭС грунтов и грунтовых вод на территории Пермского края, Республики Коми, Тюменской области, Республики Саха (Якутии). Данные успешно применены для построения и уточнения физико-геологических моделей на этапе истолкования геофизических данных при решении широкого круга задач.

Полученные с использованием разработанной методики результаты доказывают второе защищаемое положение.

ГЛАВА III

Оценка перспективности месторождений

грунтовых строительных материалов методами электрометрии

В главе III диссертации приводятся примеры практического использования методики второго защищаемого положения в составе замкнутого цикла электроразведочных исследований при поиске и оценке перспективности грунтовых строительных материалов вокруг семи нефтяных месторождений: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского.

Натурные наблюдения выполнены методом ВЭЗ, выбор которого обусловлен высокой мобильностью, низкими трудозатратами и оптимальным соотношением между требуемой детальностью и стоимостью работ. Измерения проведены на участках с наиболее благоприятными инженерно-геологическими условиями.

В ходе обработки и первичной количественной интерпретации получена геоэлектрическая модель среды, отражающая особенности строения и изменения электрических свойств грунтов до глубины 15 м. С помощью зависимости УЭС рыхлых пород (А.А. Огильви, 1990) и палетки А.А. Рыжова, рассчитанной В.А. Шевниным для условий емкости катионного обмена $EKO = 1,5$ г/л, выполнена предварительная оценка процентного содержания глинистого материала песчано-глинистых грунтов с учетом влажности, минерализации грунтовых вод и температуры. Проведено картирование исследуемой территории, определены участки, перспективные на содержание различных грунтовых строительных материалов. На основании полученных прогнозных карт выполнена постановка буровых работ. Результаты первичной количественной интерпретации ВЭЗ согласуются с данными заверочного

бурения. С учетом последних, построены окончательные геоэлектрические модели среды: по материалам параметрических зондирований выполнена привязка геоэлектрических горизонтов к выделенным инженерно-геологическим элементам.

На этапе лабораторных исследований уточнена зависимость УЭС грунтов от их литологического состава. Измерения на образцах проведены по описанной в главе II методике, в условиях, близких к естественной влажности. Построены диаграммы распределения УЭС дисперсных грунтов для каждого месторождения (рис. 3, а). Минерализация грунтовых вод на участках исследования изменяется от 0,2 до 0,6 г/л. Наиболее часто встречаемые значения сопротивлений глин и суглинков согласуются с данными зависимости, рассчитанной В.А. Шевниным для условий ЕКО = 1,5 г/л. Отложения супеси и песка характеризуются более высокими значениями сопротивлений. Завышение УЭС песчаных грунтов связано, главным образом, с неполной степенью водонасыщения отложений, а также наличием примесей органических веществ, включений обломочного материала.

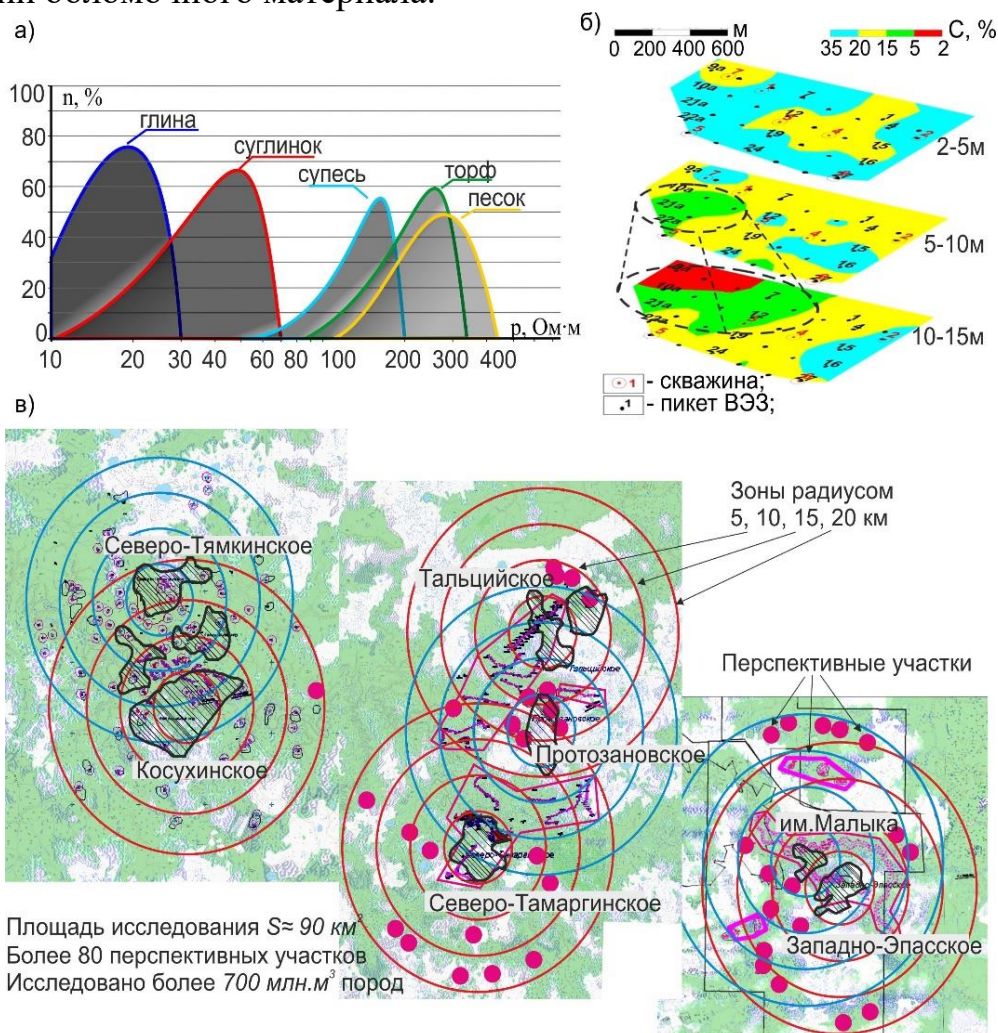


Рисунок 3. Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов: а – распределения УЭС дисперсных грунтов на примере Протозановского месторождения, б – карты процентного содержания глинистого материала в интервале глубин 2-5 м, 5-10 м, 10-15 м на примере первого перспективного участка Протозановского месторождения, в – схема расположения перспективных участков вокруг исследуемых нефтяных месторождений

С учетом результатов лабораторных исследований построены окончательные интервальные карты процентного содержания глинистого материала для всех выделенных перспективных участков (рис. 3, б). Кроме того, определена балльность, используемая для инженерно-геологического районирования территории (В.В. Середин).

На оценочном этапе для каждого перспективного участка выполнен подсчет объемов песчано-глинистых грунтов и торфяных залежей (табл. 2). Подобный цикл работ выполнен на каждом перспективном участке в зонах поиска радиусом 20 км вокруг семи нефтяных месторождений (рис. 3, в). Информация использована недропользователем для оценки эффективности освоения перспективных участков в качестве месторождений грунтовых строительных материалов.

Таблица 2

Объемы грунтов с различным содержанием глин (на примере первого перспективного участка Протозановского месторождения)

Геоэлектрический горизонт, глубина залегания	Объем пород с соответствующим процентным содержанием глин, тысяч м ³			
	35-20 %	20-15 %	15-5 %	5-2 %
1 слой, 0-0,9 м	Объем торфа V = 2400			
2 слой, 0,9-2,4 м				
3 слой, 2,4-5 м	1874	729	—	—
4 слой, 5-10 м	1490	2234	931	—
5 слой, 10-15 м	570	3230	1330	380
Итого:	3934	6193	2261	380

Площадь участка 1 км², исследованный объем пород 15 млн. м³.

Анализ выполненных исследований позволил сформировать следующие выводы:

1. Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов в составе замкнутого цикла поисковых электроразведочных исследований успешно применена при определении местоположения залежей грунтовых строительных материалов.

2. Лабораторные измерения УЭС образцов грунтов, выполненные по защищаемой методике, позволили определить их петрофизические характеристики в условиях, близких к естественной влажности. Применение петрофизического подхода дает информацию о характеристиках грунтов всего исследуемого объема пород, повышает эффективность оценки инженерно-геологических условий.

3. По итогам исследований проведена оценка перспективности более 80 участков для использования обследованных грунтов в качестве различных строительных материалов в зонах радиусом 20 км вокруг следующих нефтяных месторождений: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского. Комплексный подход к изучению строения недр позволяет учесть геологические

и экономические факторы при планировании рационального и безопасного освоения минерально-сырьевой базы.

Результаты поисково-оценочных работ показали успешное практическое применение защищаемой методики лабораторного измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов [2, 7, 12, 13].

ГЛАВА IV

Методика определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений методами постоянного тока

В главе IV диссертации обосновывается третье защищаемое положение: *«Методика определения величины заглубленной части фундаментов, основанная на скважинных измерениях электрического поля постоянного тока, позволяющая определять геометрические характеристики конструкций инженерных сооружений в условиях невозможности исследования прямыми методами»* [1, 3, 4, 6, 8, 12].

Выполнен анализ результатов геофизических методов, используемых для решения данной задачи (А.В. Татаркин, С.М. Простов, Н.М. Васильев, В.В. Капустин, Г.И. Квятковский, И.А. Санфиров, Ю.И. Степанов, Р. Dong и др). В соавторстве с А.В. Татаркиным и К.В. Голубевым [1] предложен способ определения величины заглубленной части фундаментов методом электрического каротажа в скважине, пробуренной параллельно на расстоянии, близком к длине зонда (1–2 м). Основным преимуществом способа является отсутствие необходимости заземления питающих электродов на конструкции сооружения, что позволяет проводить обследование несущих нагрузку фундаментов.

Теоретическое обоснование методики полевых работ и определение интерпретационных критериев выполнены по результатам моделирования. Численное моделирование проведено в программе ZondRes3D. Расчеты электрического поля выполнены для трехмерных моделей с различными предполагаемыми конструкциями заглубленной части фундаментов в однородной среде (рис. 4, а). Для измерений рекомендуется трехэлектродная установка, обладающая оптимальным соотношением детальности и глубины исследования в условиях ограниченного пространства. Физическое моделирование выполнено для ситуации, изображенной на рис. 4, а, в однородной среде сопротивлением 12 Ом·м. В качестве модели сваи взят пластиковый брусок, измерения проводились трехэлектродной установкой на различных удалениях от объекта исследования (рис. 4, б). Результаты моделирования показали целесообразность применения трехэлектродной установки для определения глубины погружения фундамента. Установлено, что аномальный эффект представлен максимумом графика КС над нижним концом сваи (назовем его основным). Амплитуда составляет около 100% относительно сопротивления среды при удалении скважины от объекта исследования на расстоянии $(0,2-0,3) \times L$, где L – длина зонда. При удалении скважины от объекта исследования аномальный эффект уменьшается и на расстоянии большем или равном длине зонда, стремится к нулю. В случае объектов, по ширине

превышающих длину зонда, чувствительность остается достаточной и на расстоянии L .

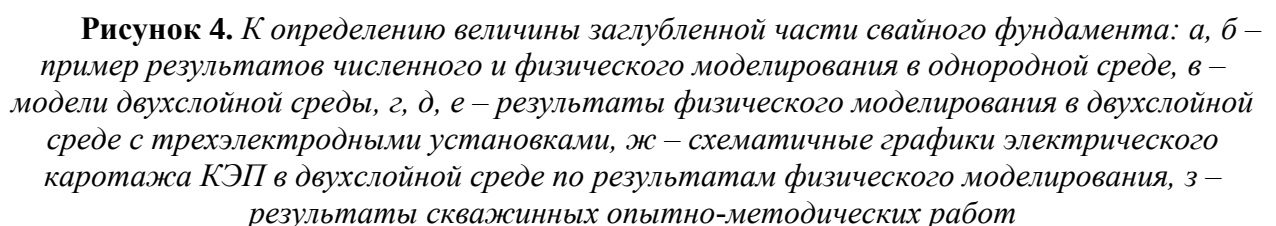
Апробация предложенной методики выполнена в ходе опытно-методических работ на одной из крупных промышленных площадок Пермского края предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Полевые наблюдения проведены стандартной электроразведочной аппаратурой с зондом А0,7М0,2N, размеры выбраны, исходя из результатов моделирования. Бурение скважин производилось при максимально возможном приближении к исследуемым фундаментам от 0,5 до 1,5 м. Средняя глубина забоя скважин составляла 4 м, диаметр выработок варьировал от 50 до 80 мм. Измерения проводились дискретно с шагом 0,1-0,2 м, по результатам строились графики КС (рис. 4, з).

Заверка результатов наблюдений выполнена на ряде объектов с известными геометрическими характеристиками фундаментов. Данные интерпретации согласуются с технической документацией в рамках погрешности полевых наблюдений. Позднее для некоторых объектов были выполнены исследования прямыми методами, которые подтвердили достоверность результатов интерпретации.

Таким образом, доказано, что в средах, близких по строению к однородным, предложенный способ исследований дает однозначные результаты: величина заглубленной части фундамента определяется по положению основного максимума [1]. Для доопределения обратной задачи могут быть использованы одновременные измерения с зондами разной величины (А.В. Татаркин, 2019).

В рамках развития методики проведены исследования для более сложных геологических условий слоистых сред. При определении глубины погружения фундаментов в слоистых средах предлагается применение скважинного варианта комбинированного электропрофилирования (КЭП) встречными установками. Закономерности распространения поля постоянного тока и интерпретационные критерии установлены по результатам физического моделирования [8].

Первый слой был представлен песком с относительно повышенным сопротивлением, второй слой – глинистым грунтом с меньшим сопротивлением. Изучены два случая нахождения сваи в слоистой среде: геологическая граница находилась посередине заглубленной части сваи, положение конца сваи совпадало с геологической границей. Наблюдения выполнены в баке для моделирования на поверхности среды, а не в скважинном варианте (рис. 4, в). Горизонтально расположенная свая в построенных моделях эквивалентна участку погруженной части вертикально расположенной сваи фундамента. Данные модели не учитывают влияние верхнего полупространства, но позволяют оптимизировать процесс наблюдений, контролировать качество заземления, минимизировать изменение свойств грунтов и их сплошности. Материалы физического моделирования и результаты их анализа представлены в виде графиков комбинированного электропрофилирования (рис. 4, г, д, е, ж). Полученная информация подтверждается результатами экспериментов и опытно-методических работ – на расстоянии длины зонда наблюдается дополнительный максимум (рис. 4, з).



Результаты исследований разных лет позволили сделать следующие выводы:

1. Предлагается методика электрометрических скважинных измерений, позволяющая определять величину заглубленной части фундаментов зданий и сооружений без проведения вскрытия. В простых геологических условиях (в средах, близких к однородным) достаточно использование трехэлектродного зонда AMN. В слоистых контрастных средах наиболее информативным является КЭП встречными установками AMN и MNB.

2. В качестве критериев интерпретации следует использовать максимумы графиков профилирования, обладающие соответствующей величиной аномального эффекта. При измерении трехэлектродной установкой от конца сваи наблюдается два экстремума. Первый (основной) максимум наблюдается, когда точка записи находится над концом сваи. Второй максимум наблюдается, если над концом сваи находится питающий электрод. В модификации КЭП второй максимум расположен на расстоянии длины зонда до основного при измерении установкой MNB, и после него при измерении установкой AMN.

3. Величина аномального эффекта зависит от различных факторов и составляет порядка 100% для основного максимума при удалении скважины на расстояние 0,2–0,3 длины зонда. Величина второго (дополнительного) максимума несколько меньше.

4. В средах, близких по строению к однородным, методика дает однозначные результаты: величина заглубленной части сваи определяется по положению основного максимума. В двухслойной среде определение глубины погружения сваи является однозначным по паре соответствующих максимумов, если ее нижний конец находится на расстоянии, большем длины зонда от геологической границы. Если нижний конец сваи совпадает с геологической границей, основной максимум попадает в зону контакта, где графики профилирования имеют сложную форму. Величина заглубленной части фундамента в подобных условиях определяется с использованием дополнительных максимумов графиков КЭП.

5. Ключевым преимуществом защищаемой методики является возможность обследования несущих нагрузку фундаментов, отсутствие необходимости заземления питающих электродов на элементы его конструкции, возможность изучения строения и свойств грунтового основания.

Результаты исследований справедливы для фундаментов различных типов, в том числе свайного, стаканного, плитного, ленточного. Положительные результаты опытно-методических работ с использованием разработанной методики являются доказательной основой третьего защищаемого положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. Разработана методика электрометрических исследований водных переходов, основанная на использовании измерений со дна водоемов и определенной стадийности наблюдений. Методика позволяет повысить разрешающую способность, глубинность и оперативность исследований. Показана эффективность применения программ автоматической 3D инверсии и подтверждена необходимость использования 1D интерпретации на различных этапах истолкования донных ВЭЗ. Апробация предложенной методики в рамках геологических исследований позволила получить данные о строении участков переходов линейных сооружений транспортной инфраструктуры осваиваемых месторождений углеводородов через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору, Харьгу.

2. Выполнено теоретическое обоснование и совершенствование методики определения удельных электрических сопротивлений образцов дисперсных грунтов с помощью микроустановки Шлюмберже. Исследованы зависимости УЭС от размеров образцов правильной формы, что позволяет применять методику при измерениях на монолитах и рядовых пробах практически любых размеров как в полевых, так и в лабораторных условиях. Получены распределения удельных электрических сопротивлений основных типов грунтов для Пермского края, Республики Коми и Тюменской области.

3. Выполнен замкнутый цикл электроразведочных исследований при поиске и оценке перспективности месторождений грунтовых строительных материалов. По результатам практического использования предложенной методики лабораторного измерения УЭС определены петрофизические характеристики грунтов, выполнено районирование территории, подсчет площади и объемов грунтов различного литологического состава. Оценена перспективность грунтов семи нефтяных месторождений Западной Сибири: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского. Благодаря стадийности исследований удалось сократить объем поискового бурения вдвое.

4. Выполнено теоретическое обоснование и разработана методика определения величины заглубленной части фундаментов скважинными методами электрометрии постоянного тока. Определены интерпретационные критерии в однородной и слоистой средах, представленные системой соответствующих максимумов параметров электрического поля. По результатам апробации методики проведена оценка величины погружения фундаментов инженерных сооружений нефтяной инфраструктуры на одной из промышленных площадок ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

5. Разработанная технология оценки инженерно-геологических условий методами электрометрии постоянного тока, состоящая из трех взаимосвязанных методик исследований, внедрена в производство на предприятии ООО НИПППД «Недра» и применяется при проектировании обустройства нефтяных месторождений с целью обеспечения рационального и безопасного недропользования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. Татаркин А.В., Голубев К.В., **Филимончиков А.А.** Определение методами электрометрии характеристик фундаментов при реконструкции и строительстве зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2013. Вып. 5. С. 30-32.
2. Середин В.В., Пушкарёва М.В., Лейбович Л.О., Бахарева А.О., Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** Изменение геологической среды при разработке нефтяных месторождений в сложных горно-геологических условиях // Нефтяное хозяйство, 2014. Вып. 12. С. 153-155.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

3. Колесников В.П., Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** О применении методов электрометрии в целях безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика, 2011. Вып. 5. С. 59–64.
4. Колесников В.П., Татаркин А.В., Пригара А.М., **Филимончиков А.А.** Инженерно-геофизические исследования в условиях подработанных территорий // Инженерные изыскания, 2012. Вып. 9. С. 25–32.
5. Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** Возможности 3D-инверсии данных электрических зондирований в условиях акваторий // Геофизика, 2014. Вып. 5. С. 21-25.
6. **Филимончиков А.А.**, Татаркин А.В. Оценка рисков изменений геотехнических условий на подработанных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. №4. С. 123-128.
7. **Филимончиков А.А.**, Татаркин А.В., Гилева М.И. Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов методами электрометрии // Записки Горного института (СПбГУ), 2015. Т. 212. С. 130-134.
8. **Филимончиков А.А.** Физическое моделирование электрических полей для определения глубины залегания свайного фундамента в двухслойной среде // Геофизика, 2016. Вып. 5. С. 19-22.

Статьи в периодических изданиях, индексируемых в РИНЦ

9. Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** Прогноз инженерно-геологических условий на участках переходов продуктопроводов через водные преграды // Вестник Пермского университета. Геология, 2013. Вып. 4. С. 28-35.
10. Гилева М.И., Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** К вопросу определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов в лабораторных условиях // Вестник Пермского университета. Геология, 2014. Вып. 1. С. 44-48.

11. **Филимончиков А.А., Татаркин А.В.** Уточнение инженерно-геологических условий при реконструкции зданий и сооружений // Геология в развивающемся мире, 2014. Т. 1. С. 291-293.
12. **Филимончиков А.А.** Электроразведочные исследования в сложных инженерно-геологических условиях // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики, 2017. С. 202-207
13. **Филимончиков А.А.** Методики электроразведки постоянным током при решении инженерно-геологических и геотехнических задач // Сборник трудов Уральской молодежной научной школы по геофизике, 2018. С. 202-207.
14. **Филимончиков А.А., Татаркин А.В.** К оценке разрешающей способности акваториальных электроразведочных исследований // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Пермь, ПГНИУ. 2020. С. 241-247.

Подписано в печать __.01.2022. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 1,4. Тираж _____ экз. Заказ _____

Отпечатано в типографии ПГНИУ
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Тел./факс: (342) 239 65 47