

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

Москва 2021

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Пермский государственный
национальный исследовательский университет».

Научный руководитель: **Костицын Владимир Ильич**,
доктор технических наук,
профессор кафедры геофизики ПГНИУ

Официальные оппоненты:

Ведущая организация: Горный институт
Уральского отделения Российской академии наук
(ГИ УрО РАН), г. Пермь

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в ____, на заседании
диссертационного совета Д 002.001.01 при Институте физики Земли РАН по
адресу: 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН «Институт
физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук» (ИФЗ РАН) по
адресу: 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК
при Министерстве науки и высшего образования РФ: vak.ed.gov.ru/vak и на
сайте ФГБУН «Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской
академии наук»: www.ifz.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Заместитель директора
по научной работе, к.г.-м.н.

Камзолкин
Владимир Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

На всех стадиях строительства сооружений, зданий и других инженерных объектов необходимо проведение инженерно-геологических изысканий, в состав которых, согласно нормативным документам, входят инженерно-геофизические исследования. Среди геофизических методов при инженерных изысканиях важную роль имеют методы электрометрии постоянного тока [СП 11-105-97, СП 47.13330.2016, ГОСТ 9.602-2016, РСН 64-87].

Актуальность рассматриваемых в диссертации материалов обусловлена необходимостью решения производственных задач, повышения оперативности, снижения рисков инженерных изысканий, уменьшения стоимости исследований. Наиболее актуальными и требующими изучения в рамках производственной деятельности автора являются следующие направления: 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 задач внесли А.А. Огильви, В.К. Хмелевской, Б.К. Матвеев, В.В. Глазунов, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.А. Рыжов, В.П. Колесников, А.В. Татаркин, А.А. Бобачев, Н.Б. Дортман, Ю.Д. Зыков, Г.И. Квятковский, Н.М. Васильев, В.В. Капустин, С.М. Простов, P. Dong, V. Fritsch и др.

Актуальность исследований повышается в сложных горно-геологических и геотехнических условиях, поскольку существуют ситуации, в которых исследование прямыми методами невозможно, а поверхностными геофизическими – затруднительно.

Цель работы

Разработка технологии электрометрии на постоянном токе для оценки инженерно-геологических условий при проектировании, строительстве, эксплуатации, ликвидации зданий и инженерных сооружений.

Основные задачи исследований

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

2. Теоретическое обоснование и совершенствование методики лабораторного измерения удельных электрических сопротивлений (УЭС) 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 электротометрии при решении инженерно-геологических задач.

Основные защищаемые положения

1. Методика исследования водных переходов, основанная на интерпретации результатов электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность геофизических исследований, увеличить оперативность, снизить риски и стоимость инженерных изысканий [5, 7, 10, 11, 13].

2. Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов (и грунтовых вод), основанная на результатах исследований влияния их геометрических размеров, позволяющая определять УЭС и петрофизические характеристики парафинированных монолитов и рядовых проб практически любых размеров и сократить трудозатраты, как в полевых, так и в лабораторных условиях [1, 8, 9, 12, 13].

3. Методика определения величины заглубленной части фундаментов, основанная на скважинных измерениях электрического поля постоянного тока, позволяющая определять геометрические характеристики конструкции заглубленной части фундаментов инженерных сооружений в условиях невозможности исследования прямыми методами [2, 3, 4, 6, 7, 14].

Научная новизна

1. Установлено, что донные наблюдения методами электротометрии постоянного тока повышают разрешающую способность, глубинность наблюдений и рекомендуются для изучения тонкой слоистости донных отложений при малоглубинных исследованиях акваторий. Определены преимущества использования донных электротометрических наблюдений в зимний период времени. Показана эффективность применения 3D инверсии на этапе постановки буровых работ. Подтверждена необходимость использования аппарата 1D интерпретации при расчленении тонкослоистого разреза донных отложений на стадии истолкования с учетом результатов бурения. Разработана методика уточнения инженерно-геологических условий методами

электрометрии на участках переходов 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 удельных электрических сопротивлений 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 для нахождения величины заглубленной части фундаментов в однородной и слоистой средах. Разработана методика определения величины заглубленной части фундаментов скважинными методами электрометрии постоянного тока.

Практическая значимость исследований

1. Разработанная методика акваториальных измерений при исследовании водных переходов позволяет повысить детальность, глубинность и оперативность инженерных изысканий за счет предложенной стадийности исследований. Применение предложенной методики в рамках инженерно-геологических изысканий позволило получить детальные геоэлектрические модели среды для участков переходов инженерных сооружений через следующие водотоки: р. Яйву, р. Колву, р. Ухту, р. Печору, р. Харьгу.

2. Экспресс методика измерения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов использована как в полевых, так и в лабораторных условиях. Составлены распределения удельных электрических сопротивлений основных типов грунтов для ряда регионов Пермского края, Республики Коми и Тюменской области. На основании полученных петрофизических зависимостей оценена перспективность грунтов для использования их в качестве строительных материалов семи нефтяных месторождений Западной Сибири: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского.

3. Для различных моделей строения грунтового основания получены интерпретационные критерии, представленные системой соответствующих максимумов параметров электрического поля, которые использованы при оценке геотехнических условий и определении величины заглубленной части

фундаментов инженерных сооружений одной из промышленных площадок ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

Основные методы исследований

1. Анализ и обобщение существующей информации о возможностях применения геофизических методов для оценки инженерно-геологических условий в рамках поставленных задач.

2. Численное и физическое моделирование полей постоянного тока с целью изучения корреляционных связей между петрофизическими характеристиками, искомыми свойствами объектов исследования и геоэлектрическими параметрами среды.

3. Полевые электроразведочные работы на участках водных переходов, в районах, перспективных на наличие грунтовых строительных материалов, на площадках и трассах строительства, реконструкции, эксплуатации и ликвидации инженерных сооружений.

4. Лабораторные измерения удельного электрического сопротивления монолитов и рядовых проб дисперсных грунтов.

5. Оценка петрофизических характеристик грунтов по известным корреляционным зависимостям и зависимостям, выявленным в ходе исследований.

6. Интерпретация результатов полевых работ с помощью программ 1D и 3D инверсии, сравнительный анализ результатов интерпретации.

7. Построение физико-геологических моделей (ФГМ) участков исследований, постановка буровых работ и корректировка геоэлектрических моделей с учетом результатов бурения и лабораторных измерений.

Реализация результатов исследований

Результаты исследований применялись в Научно-исследовательском проектном и производственном предприятии по природоохранной деятельности ООО НИПППД «Недра» при разработке проектной документации на стадиях строительства, реконструкции, эксплуатации линейных и площадных инженерных сооружений в Пермском крае, Республике Коми, Республике Саха (Якутии), а также при поисках перспективных месторождений грунтов в Тюменской области. Заказчиками инженерно-геологических изысканий являлись ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО "ЛУКОЙЛ-Коми", ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Транснефть», ПАО «НК Роснефть», ООО «НК Роснефть-НТЦ», ООО «ТНК-УВАТ».

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в теоретическом обосновании, разработке, совершенствовании защищаемой технологии оценки инженерно-геологических условий. Производил анализ литературных источников, обобщение имеющейся информации. Выполнял численное и физическое моделирование для прогнозирования, определения необходимых интерпретационных критериев при решении конкретных задач. На основании результатов моделирования проводил выбор, совершенствование, теоретическое обоснование и апробацию представленных методик исследований. С практической точки зрения участвовал в выполнении полевых работ, лабораторных измерениях, обработке и интерпретации материалов изысканий в рамках научно-исследовательской и производственной деятельности на предприятии ООО НИПППД «Недра». По итогам опытно-методических работ сформировал оптимальный комплекс полевых измерений, приемов обработки и интерпретации наблюдаемых данных, получил зависимости между искомыми параметрами и характером электрического поля, решил поставленные инженерно-геологические задачи.

Публикации и апробация работы

Апробация результатов научно-исследовательской деятельности выполнена в ходе опытно-методических и производственных работ. Результаты исследований по теме диссертации изложены в 14 публикациях, из них 2 – в журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, 8 статей – в журналах из перечня ВАК. Основные положения и результаты исследований докладывались на V научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2012); 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); VII научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 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. В.И. Костицыну. Автор признателен д.т.н. В.П. Колесникову и к.т.н. А.В. Татаркину за ценные советы и всевозможную поддержку в научной деятельности. Автор благодарит профессора кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых СПГУ, д.т.н. В.В. Глазунова, генерального директора ООО НИПППД «Недра», д.г.-м.н. В.В. Середина, профессора кафедры геофизики ПГНИУ, д.т.н. В.А. Гершанока, 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. Автор благодарен А.В. Кокоткину и К.В. Голубеву за предоставленную возможность проведения исследований.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Изложена на 154 страницах машинописного текста, включает 67 рисунков, 12 таблиц и содержит список литературы из 93 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 интерпретации результатов электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность геофизических исследований, увеличить оперативность, снизить риски и стоимость инженерных изысканий» [5, 7, 10, 11, 13].*

Выполнен анализ информации по применению методов электрометрии постоянного тока для исследования акваторий. Считается, что донные установки в отношении глубинности при небольшой мощности водного слоя не обладают заметными преимуществами (А. А. Огильви). Как показывает опыт производственных работ, наблюдения со дна водоемов являются целесообразными и необходимыми в сложных инженерно-геологических условиях.

В подтверждение приводятся материалы геофизических исследований водного перехода через р. Яйву в зимний период времени. Решались следующие задачи: выявление особенностей строения геологического разреза с последующей постановкой буровых работ; уточнение свойств и прослеживание литологических границ в межскважинном пространстве; изучение морфологии дна; локация продуктопровода в пространстве; определение характеристик, необходимых для проектирования электрохимической защиты.

Наблюдения выполнены методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) по берегам, со дна и с поверхности в русле реки. На этапе контроля качества полевого материала выполнен сравнительный анализ кривых кажущегося сопротивления (КС) с поверхности и со дна водоема. Установлено расхождение левых ветвей кривых вследствие влияния льда на результаты поверхностных 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).

Перед интерпретацией по результатам численного моделирования оценено влияние водной толщи на результаты донных измерений при различном соотношении УЭС воды и грунтов. Для постановки буровых работ в русле реки выполнена экспресс количественная интерпретации в программе 3D инверсии (Е.А. Каминский). С целью повышения оперативности разработан конвертер данных из формата «Зонд», измеренных аппаратурой АМС-1, в формат программы ZondRez3d. Входными данными являлись кривые КС со дна реки, рассчитанные 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 3D 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 (находятся во внутренних точках среды), при расчете кривых КС со дна предварительно необходимо корректировать коэффициент установки для условий полного пространства.

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» с учетом данных бурения (рис. 1, в, д).

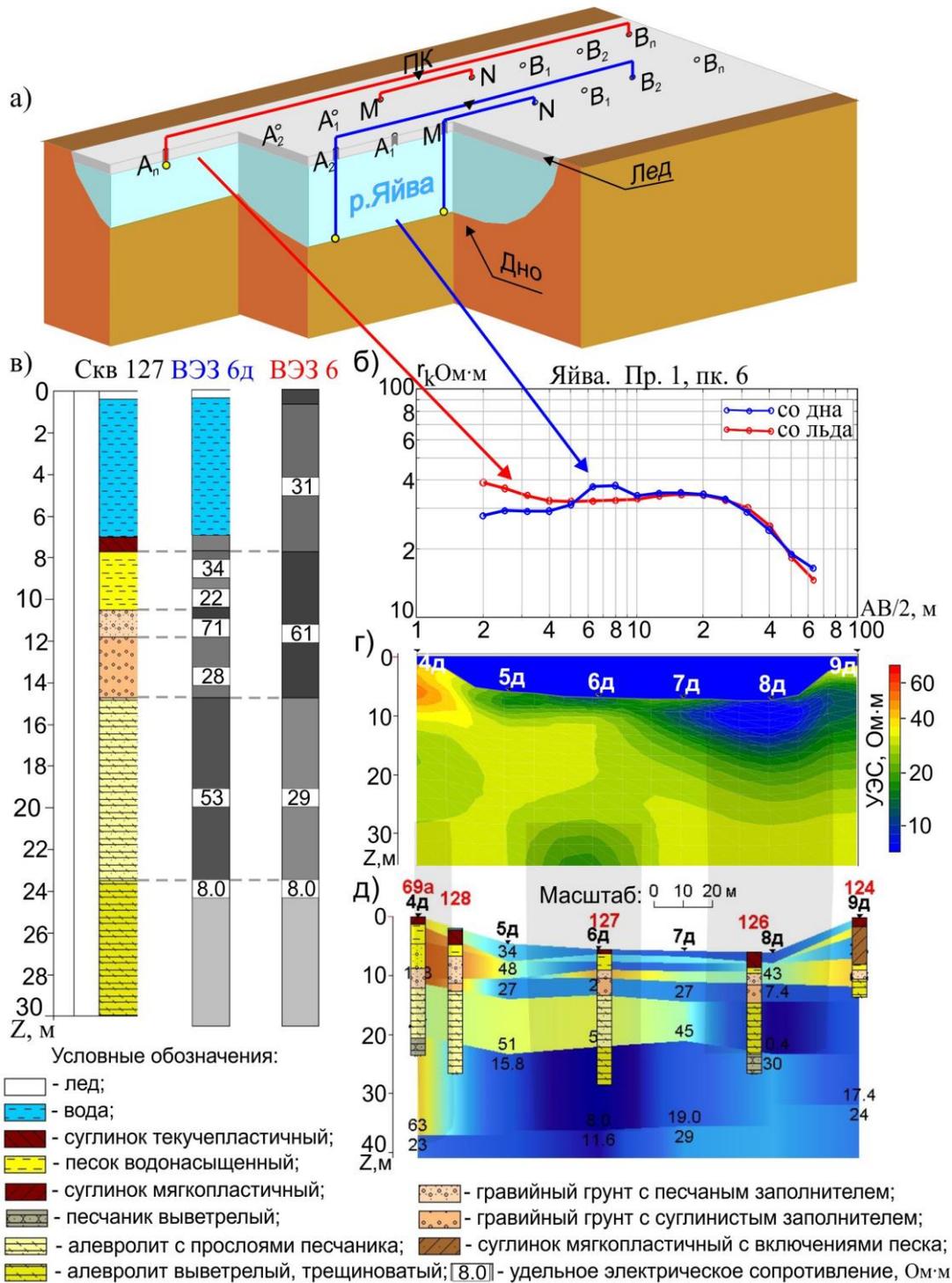


Рис. 1. Результаты исследования водного перехода через реку Яйву: а – схема выполнения зондирования, б – кривые кажущихся сопротивлений, в – результаты параметрического анализа, г, д – геоэлектрический разрез по данным 3D и 1D инверсии

На основании полученной геоэлектрической модели среды выполнено контрольное бурение для подтверждения наличия песчаников на ПК 4, проведено прослеживание границ инженерно-геологических элементов, уточнение электрических свойств прирусловых отложений. На последнем этапе исследований выполнен сравнительный анализ результатов 3D и 1D инверсии поверхностных и донных наблюдений.

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 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 3D инверсии, характеризуется большей интегральностью по сравнению с одномерной интерпретацией, поэтому на этапе построения окончательной тонкослоистой ФГМ рекомендуется применение программ 1D инверсии.

4. Сходимость по глубине с базовым геологическим методом изменяется от единиц до первых десятков процентов. Измерения со дна реки обладают большей разрешающей способностью и меньшей погрешностью определения границ инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Однако для прогнозирования необходимо дополнять донные исследования наблюдениями с поверхности реки, что позволяет осуществлять контроль получаемой информации и является одним из способов доопределения обратной задачи.

5. Области изменения удельного электрического сопротивления грунтов, выделенные в ходе геофизических исследований, подтверждаются результатами бурения. При составлении программы изысканий 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 процесса изысканий.

Полученные выводы являются основой первого защищаемого положения. Предложенная методика была применена и отработана в ходе производственной деятельности в ООО НИПППД «Недра» при исследовании водных переходов через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору и Харьягу.

ГЛАВА II

Методика определения удельных электрических сопротивлений образцов дисперсных грунтов

В главе II раскрывается **методическое значение** второго защищаемого положения: *«Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов (и грунтовых вод), основанная на результатах исследований влияния их геометрических размеров, позволяющая определять УЭС и петрофизические характеристики парафинированных монолитов и рядовых проб практически любых размеров и сократить трудозатраты, как в полевых, так и в лабораторных условиях» [8, 9, 12, 13].*

Выполнен анализ существующих методик лабораторного измерения УЭС, основанных на использовании различных двух-четырёхэлектродных установок, измерительных ячеек и кернодержателей. Перечислены недостатки рассмотренных методик. 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 АМNB 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 (V. Fritsch). Поскольку на практике пробы дисперсных грунтов имеют форму цилиндра, куба или параллелепипеда, то с помощью моделирования изучено влияние геометрических размеров образца правильной формы на результаты измерений.

Численное моделирование выполнено в программе «ZondRes3d». Измерительная установка АМNB 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 КС. 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 измерительной установки (AB, рис. 2, в). Сечения куба позволяют найти отклонение определения УЭС для образцов правильной формы и соответствующих геометрических размеров. Например, в практике инженерно-геологических изысканий наиболее часто встречаются образцы керна с диаметром около 10 см. Используя полученную номограмму, можно оценить отклонение сопротивления при различной высоте пробы.

На основании массива вычисленных данных получена 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 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 отклонение находится 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, анизотропия оказывает влияние в рамках погрешности полевых наблюдений. Это позволяет проводить измерения вдоль пробы керна.

По описанной выше методике выполнены полевые и лабораторные измерения на образцах, полученных при выполнении изысканий на различных объектах исследований ООО НИПППД «Недра» в Пермском крае, Республике Коми, Тюменской области, Республике Саха (Якутии).

Пример распределения изменений УЭС некоторых грунтов Пермского края и Республики Коми изображен на рис. 2, д.

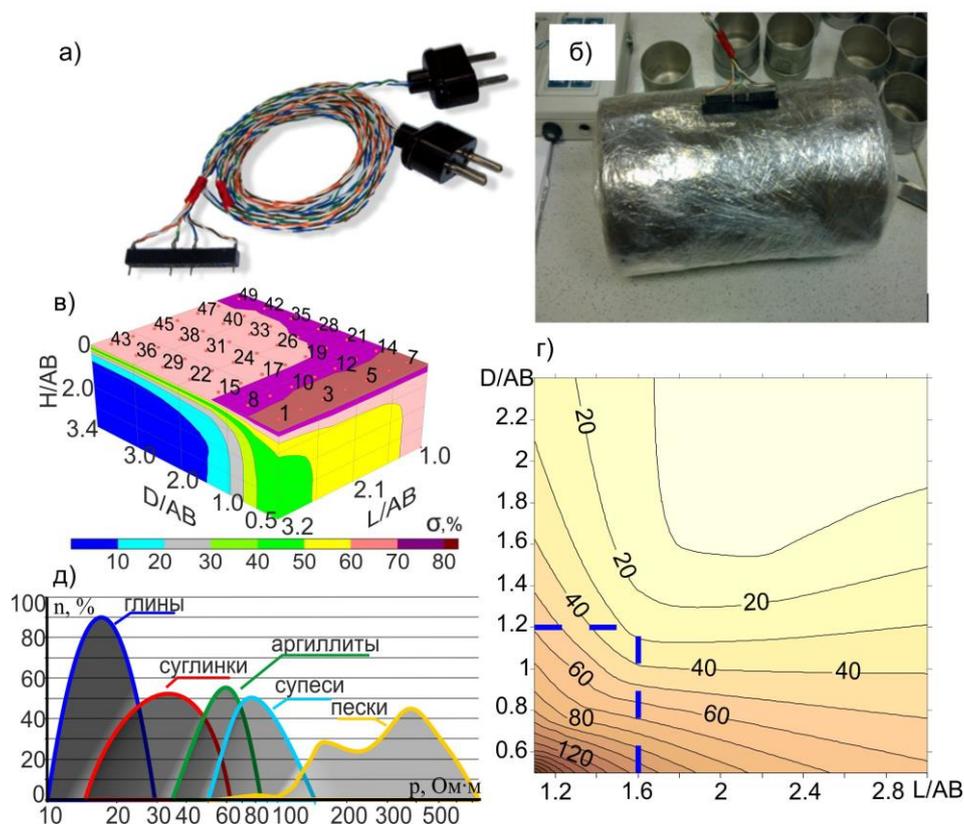


Рис. 2. Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов: а – внешний вид микроустановки Шлюмберже, б – проведение измерений на образце керна, в, г – зависимости по результатам численного и физического моделирования, д – распределения удельных электрических сопротивлений 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 ФГМ на этапе физико-геологического истолкования геофизических данных.

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. Изучено влияние микроанизотропии на результаты измерений.

3. Предлагаемая методика позволяет проводить измерения на образцах правильной формы произвольных размеров с сохранением их

герметичности и сплошности, существенно сократить трудозатраты и потерю времени на измерения в полевых и лабораторных условиях.

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

Выводы подтверждают методическое значение второго защищаемого положения.

ГЛАВА III

Оценка перспективности месторождений

грунтовых строительных материалов методами электрометрии

В главе III диссертации на примере месторождений Западной Сибири обосновывается **практическая значимость** второго защищаемого положения: *«Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов (и грунтовых вод), основанная на результатах исследований влияния их геометрических размеров, позволяющая определять УЭС и петрофизические характеристики парафинированных монолитов и рядовых проб практически любых размеров и сократить трудозатраты, как в полевых, так и в лабораторных условиях» [1, 8, 12, 13].*

Представлен замкнутый цикл геофизических исследований поиска грунтовых строительных материалов в районе семи нефтяных месторождений: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинское, им. Малыка, Западно-Эпасского.

Полевые 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 палеток А.А. Огильви и А.А. Рыжова осуществлена 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 бурения. С учетом последних, построены окончательные геоэлектрическая модель 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, на образцах проведены измерения по методике, описанной в главе II. Построены диаграммы распределения УЭС дисперсных грунтов для каждого месторождения (рис. 3, а). Исследуемые грунты обладают более высокими сопротивлениями относительно зависимости А.А. Рыжова. Завышение УЭС грунтов происходит за счет примеси органических веществ, включений и уменьшения влажности отложений.

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

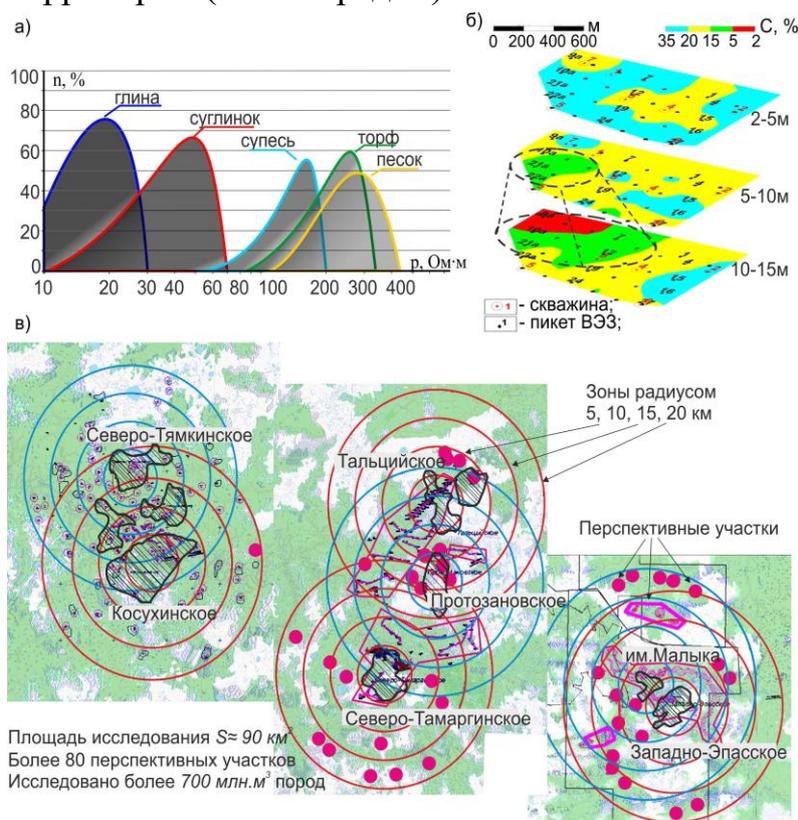


Рис. 3. Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов: а – распределения УЭС дисперсных грунтов на примере Протозановского месторождения, б – карты процентного содержания глинистого материала в интервале глубин 2-5 м, 5-10 м, 10-15 м на примере первого перспективного участка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

На оценочном этапе для каждого перспективного участка выполнен подсчет объемов песчано-глинистых грунтов и торфяных залежей (табл. 3). Подобный цикл работ выполнен на каждом перспективном участке в зонах поиска радиусом 20 км вокруг семи нефтяных месторождений (рис. 3, в). В дальнейшем информация использована для определения перспективности встреченных грунтов в качестве различных строительных материалов.

Таблица 3

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.

Проведенные поисково-оценочные исследования позволили сформировать следующие выводы:

1. Геофизические исследования, выполняемые на поисковом этапе, могут успешно применяться для определения местоположения залежей грунтовых строительных материалов. Такой подход эффективен и позволяет учесть горнотехнические и экономические факторы при планировании рационального недропользования и дальнейшего проектирования инфраструктуры.

2. Лабораторные измерения УЭС образцов грунтов, выполненные по защищаемой методике, позволяют определять их петрофизические характеристики. Применение петрофизического подхода дает информацию о характеристиках грунтов всего исследуемого объема пород, повышает эффективность инженерно-геологических изысканий на стадии до и после буровых работ.

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.

Результаты поисково-оценочных работ подтверждают практическую значимость второго защищаемого положения.

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 конструкции заглубленной части фундаментов инженерных сооружений в условиях невозможности исследования прямыми методами»* [2, 3, 4, 6, 7, 14].

Выполнен анализ результатов геофизических методов, используемых для решения данной задачи, перечислены их ограничения. Предложена методика определения величины заглубленной части фундаментов методом электрического каротажа в скважине, пробуренной параллельно на расстоянии, близком к длине зонда (1–2 м). Выбор метода электрметрии обусловлен отсутствием описанных недостатков и существенными преимуществами: небольшой стоимостью оборудования и проведения работ, малыми сроками проведения наблюдений, достаточной точностью для практических целей.

Теоретическое обоснование методики полевых работ и интерпретационные критерии определены 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 (назовем его основным) над нижним концом сваи. 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 .

Опробование предложенной методики проведено в ходе опытно-методических работ на одной из крупных промышленных площадок Пермского края предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Полевые наблюдения выполнены 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, а 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, защищаемая методика дает однозначные результаты: величина заглубленной части фундамента определяется по положению основного максимума.

В ходе физического моделирования изучены закономерности поля постоянного тока для определения глубины погружения фундаментов в слоистых средах.

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 и 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, представленные в виде схематичных графиков комбинированного электропрофилирования (КЭП), изображены на рис. 4, г, д, е, ж. Полученная информация подтверждается результатами опытно-методических работ – на расстоянии длины зонда наблюдается дополнительный максимум (рис. 4, з).

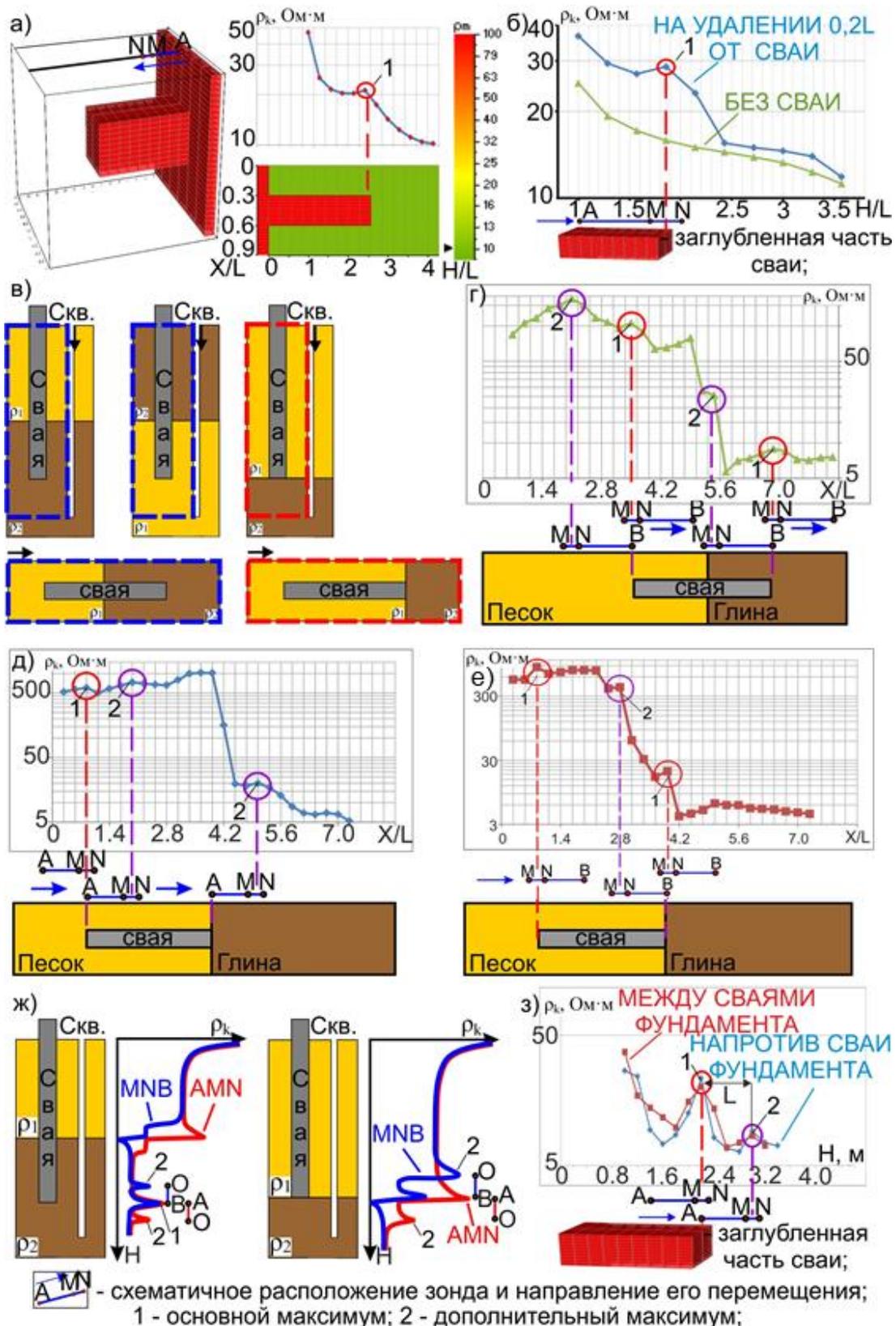


Рис. 4. К определению величины заглубленной части свайного фундамента: а, б – пример результатов численного и физического моделирования в однородной среде, в – модели двухслойной среды, г, д, е – результаты физического моделирования в двухслойной среде с трехэлектродными установками, ж – схематические графики электрического каротажа КЭП в двухслойной среде по результатам физического моделирования, з – результаты скважинных опытно-методических работ

Результаты исследований 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 оптимальным и 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 находится непосредственно над концом сваи. Второй максимум наблюдается, если над концом сваи находится питающий электрод. Тогда 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, то основной максимум попадает в зону контакта, где графики профилирования имеют сложную форму. Определение заглубленной части фундамента в данных условиях затруднительно, заключение о положении нижнего конца сваи стоит давать по дополнительным максимумам.

Результаты исследований справедливы для фундаментов различных типов, в том числе свайного, стаканного, плитного, ленточного. В реальной геологической ситуации определение глубины фундаментов может осложняться наличием тонкой слоистости пропластков различного электрического сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом диссертационных исследований является разработанная *технология электрометрии на постоянном токе для оценки инженерно-геологических условий* при проектировании, строительстве, эксплуатации, ликвидации зданий и инженерных сооружений

Основные результаты работы 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 3D инверсии и подтверждена необходимость использования 1D интерпретации на различных стадиях инженерных изысканий. Применение предложенной методики в рамках инженерно-геологических изысканий позволило получить детальные геоэлектрические модели среды для участков переходов инженерных сооружений через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору и Харьягу.

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

3. Показан замкнутый цикл ведения поисково-оценочных работ методами электрометрии для поисков месторождений грунтовых строительных материалов. Благодаря стадийности исследований удалось сократить объем поискового бурения вдвое. На основании 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. Малька, Западно-Эпасского.

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. С помощью предложенной методики выполнена оценка геотехнических условий и определена величина погружения фундаментов инженерных сооружений на одной из промышленных площадок ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

5. Разработанная технология оценки инженерно-геологических условий внедрена в производство на предприятии ООО НИПППД «Недра».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, входящих в Web of Science, Scopus, ВАК

1. Середин В.В., Пушкарева 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.

2. Татаркин А.В., Голубев К.В., **Филимончиков А.А.** Определение методами электротомии характеристик фундаментов при реконструкции и строительстве зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2013. Вып. 5. С. 30-32.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

3. Колесников В.П., Татаркин А.В., **Филимончиков А.А.** О применении методов электротомии 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.** Физическое моделирование электрических полей для определения глубины залегания свайного фундамента в двухслойной среде // Геофизика, 2016. Вып. 5. С. 19-22.

7. **Филимончиков А.А.**, Татаркин А.В. Оценка рисков изменений геотехнических условий на подработанных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. №4. С. 123-128.

8. **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.

Статьи в журналах и материалах конференций

9. 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.

10. 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.

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: сборник научных трудов / гл. ред. В. И. Костицын; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2020. С. 241-247.

Подписано в печать «__» _____ 2021 г. Формат 60×84/16
Усл. печ. л. 1. Тираж _____ экз. Заказ

Типография Института физики Земли РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.