

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

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

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Костицын Владимир Ильич

Пермь 2021

## Оглавление

Список таблиц .....	4
Список рисунков .....	5
Список аббревиатур.....	10
Введение .....	11
<b>ГЛАВА 1</b> Методика уточнения инженерно-геологических условий на участках переходов инженерных сооружений через водные преграды методами электрометрии .....	19
1.1 Анализ информации по применению методов электрометрии при исследовании акваторий .....	19
1.2 Трехмерное численное моделирование .....	24
1.3 Методика исследования водных переходов.....	45
1.3.1 Методика полевых наблюдений.....	46
1.3.2 Обработка данных и оценка качества полевого материала.....	49
1.3.3 Методика интерпретации.....	50
1.4 Аprobация и опыт применение защищаемой методики.....	53
1.4.1 Исследование водного перехода через реку Яйву .....	53
1.4.2 Исследование водного перехода через реку Печору .....	61
1.5 Выводы к главе 1.....	65
<b>ГЛАВА 2</b> Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов .....	67
2.1 Анализ существующих методик лабораторного измерения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов. 67	67
2.2 Методика измерения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов, основанная на использовании микроустановки Шлюмберже .....	75
2.2.1 Исторический очерк .....	75
2.2.2 Изучение влияния геометрических размеров образца на результаты измерений методами моделирования .....	77
2.2.3 Методика измерений и аппаратура.....	86
2.3 Аprobация и опыт применения защищаемой методики.....	89
2.4 Выводы к главе 2.....	91

ГЛАВА 3	Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов методами электротометрии.....	93
3.1	Общие сведения, актуальность, проблематика.....	94
3.1.1	Актуальность и проблематика исследований.....	94
3.1.2	Общая характеристика участка работ в районе Протозановского нефтяного месторождения.....	96
3.2	Методика инженерно-геофизических исследований.....	98
3.2.1	Методика и техника полевых электроразведочных работ.....	100
3.2.2	Методика обработки и интерпретации полевых электроразведочных материалов.....	100
3.2.3	Методика построения прогнозных карт глинистости и постановка буровых работ.....	104
3.2.4	Методика лабораторных исследований.....	105
3.2.5	Методика подсчета объемов грунтов.....	106
3.3	Результаты инженерно-геофизических исследований.....	106
3.4	Выводы к главе 3.....	116
ГЛАВА 4	Методика определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений методами постоянного тока.....	118
4.1	Анализ геофизических методов исследований величины заглубленной части фундаментов.....	119
4.1.1	Акустические методы.....	120
4.1.2	Сейсмические методы.....	123
4.1.3	Георадиолокация.....	126
4.1.4	Метод Квятковского.....	127
4.1.5	Токовый каротаж и Mise-a-la-masse метод.....	128
4.1.6	Метод сопротивлений в параллельной скважине.....	130
4.2	Трехмерное моделирование.....	131
4.2.1	Численное моделирование.....	131
4.2.2	Физическое моделирование.....	132
4.3	Методика определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений методами постоянного тока.....	143
4.3.1	Методика полевых наблюдений.....	143

4.3.2	Методика обработки и интерпретации.....	144
4.4	Апробация и опыт применения защищаемой методики.....	145
4.5	Выводы к главе 4.....	147
	Заключение .....	150
	Акт о внедрении результатов диссертационных исследований.....	153
	Список литературы .....	154

### Список таблиц

Таблица 1.1	Трехмерные численные модели .....	25
Таблица 1.2	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-II (двухслойная $\rho_1 < \rho_2$ ).....	27
Таблица 1.3	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-III (двухслойная $\rho_1 > \rho_2$ ) .....	29
Таблица 1.4	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-IV (трехслойная типа Н) .....	33
Таблица 1.5	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-V (трехслойная типа К).....	36
Таблица 1.6	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-VI (трехслойная типа А).....	39
Таблица 1.7	Результаты количественной интерпретации кривых КС модели-VII (трехслойная типа Q).....	42
Таблица 1.8	Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 69а) .....	59
Таблица 1.9	Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 126).....	59
Таблица 1.10	Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 127).....	60
Таблица 1.11	Сравнение результатов автоматической инверсии и 1D интерпретации донных ВЭЗ с данными бурения (для скважины № 127) .....	60
Таблица 3.1	Объемы грунтов с различным содержанием глин (на примере одного из перспективных участков Протозановского месторождения).....	115

### Список рисунков

Рис. 1.1	Результаты 3D моделирования в однородной среде сопротивлением $\rho=30$ Ом·м .....	26
Рис. 1.2	Результаты 3D моделирования в двухслойной среде ( $\rho_1=30$ Ом·м, $\rho_2=150$ Ом·м).....	28
Рис. 1.3	Результаты 3D моделирования в двухслойной среде ( $\rho_1=30$ Ом·м, $\rho_2=10$ Ом·м).....	30
Рис. 1.4	Номограмма двуслойных кривых ВЭЗ для поверхностной и донной установок с нанесенными результатами 3D численного моделирования .....	32
Рис. 1.5	Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа Н ( $\rho_1=30$ Ом·м, $\rho_2=10$ Ом·м, $\rho_3=30$ Ом·м).....	34
Рис. 1.6.	Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа К ( $\rho_1=30$ Ом·м, $\rho_2=150$ Ом·м, $\rho_3=30$ Ом·м).....	37
Рис. 1.7	Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа А ( $\rho_1=10$ Ом·м, $\rho_2=30$ Ом·м, $\rho_3=150$ Ом·м).....	40
Рис. 1.8	Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа Q ( $\rho_1=60$ Ом·м, $\rho_2=30$ Ом·м, $\rho_3=10$ Ом·м).....	43
Рис. 1.9	Выполнение полевых работ при измерении со дна реки.....	47
Рис. 1.10	Акваториальные электроразведочные исследования .....	47
Рис. 1.11	Сравнение кривых КС на участке водного перехода через р. Печору (ПК ВЭЗ 334) и результаты количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки.....	48
Рис. 1.12	Обзорная схема участка исследований водного перехода через р. Яйву.....	54
Рис. 1.13	Результаты геолого-геофизических исследований водного перехода через р. Яйву.....	56
Рис. 1.14	Сравнение результатов геофизических исследований со дна и с поверхности р. Яйвы.....	58
Рис. 1.15	Пример количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки (переход через р. Печору, ПК ВЭЗ 345) .....	63

Рис. 1.16	Пример количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки (переход через р. Печору, ПК ВЭЗ 342) .....	63
Рис. 1.17	Геоэлектрический разрез по трассе водного перехода через р. Печору.....	64
Рис. 2.1	Схемы для измерения электрических свойств образцов грунтов двухэлектродным способом.....	69
Рис. 2.2	Мостовая схема измерения сопротивления горных пород на высоких частотах .....	71
Рис. 2.3	Схема измерения удельного электрического сопротивления четырехэлектродным способом с расположением электродов на торцах образца.....	72
Рис. 2.4	Схема установки для определения удельного электрического сопротивления грунта в лабораторных условиях согласно ГОСТ 9.602-2016.....	74
Рис. 2.5	Измерение УЭС образцов неправильной формы с помощью микроустановки Шлюмберже .....	76
Рис. 2.6	Схема измерения УЭС образцов грунтов при помощи четырехэлектродной установки с линейным расположением электродов.....	77
Рис. 2.7	Изображение модели образца в программе ZondRes3D.....	78
Рис. 2.8	Пример графиков зависимости сопротивления от длины/ширины/высоты параллелепипеда для установки AMNB с разном R=5 см по результатам численного моделирования ....	79
Рис. 2.9	Трехмерное отображение вычисленных значений отклонения УЭС для различных геометрических размеров образца (справа) и его сечение (слева) .....	81
Рис. 2.10	Зависимость отклонения измеряемых значений сопротивления от объема образца по результатам численного моделирования.....	82
Рис. 2.11	Измерения на монолитах цилиндрической формы .....	83
Рис. 2.12	Измерение удельного электрического сопротивления с изменением геометрических размеров образца дисперсного грунта, отобранного в скв. № 5 .....	83
Рис. 2.13	График зависимость удельного электрического сопротивления от объема образца, отобранного в скв. № 5 .....	84

- Рис. 2.14 Распределение отклонений УЭС в зависимости от геометрических размеров образца с равной шириной и высотой ( $D = H$ )..... 85
- Рис. 2.15 Вид четырехэлектродной микроустановки АМNB ..... 87
- Рис. 2.16 Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов для Приволжского и Северо-Западного федеральных округов ..... 90
- Рис. 3.1 Обзорная схема района работ с нанесенными обобщенными контурами месторождений углеводородного сырья..... 93
- Рис. 3.2 Климатические и гидрогеологические условия района работ на момент проведения исследований ..... 95
- Рис. 3.3 Зависимость УЭС рыхлых пород при разной минерализации подземных вод от их литологического состава для естественной влажности (1) и полной водонасыщенности (2) ..... 104
- Рис. 3.4 Палетка А.А. Рыжова, рассчитанная В.А. Шевниным ( $EKO=1,5$  г/л) ..... 105
- Рис. 3.5 Карта прогнозного содержания глинистого материала (С, %) в интервале глубин 5-10 м одного из перспективных участков Протозановского месторождения ..... 108
- Рис. 3.6 Литологическая колонка скв. № 9 одного из перспективных участков Протозановского месторождения ..... 110
- Рис. 3.7 Результаты бурения скв. № 9 одного из перспективных участков Протозановского месторождения ..... 110
- Рис. 3.8 Пример результатов количественной интерпретации параметрического ВЭЗ вблизи скв. № 11 одного из перспективных участков Протозановского месторождения ..... 112
- Рис. 3.9 Геоэлектрический разрез по профилю 20, построенный по результатам количественной интерпретации с учетом данных бурения скважин на одном из перспективных участков Протозановского месторождения ..... 112
- Рис. 3.10 Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов Протозановского месторождения ..... 113
- Рис. 3.11 Окончательные карты процентного содержания глинистого материала в интервале глубин 2-5 м, 5-10 м, 10-15 м для одного из перспективных участков Протозановского месторождения..... 114

Рис. 3.12	Схема расположения перспективных участков вокруг нефтяных месторождений.....	116
Рис. 4.1	Основные схемы измерений .....	119
Рис. 4.2	Определение длины сваи параллельным методом .....	121
Рис. 4.3	Определение длины сваи с помощью отраженной гидроволны	122
Рис. 4.4	Схема формирования точек отражений в продольном и непродольном вариантах профилирования.....	124
Рис. 4.5	Выделение окончаний свай по точкам дифракции на временном разрезе МОГТ .....	125
Рис. 4.6	Схема наблюдений и результат сейсмоакустических исследований на оголовке сваи.....	125
Рис. 4.7	Определение длины сваи с помощью георадара .....	126
Рис. 4.8	Георадиолокационный разрез при забивке свай .....	127
Рис. 4.9	Определение длины сваи с помощью токового каротажа.....	129
Рис. 4.10	Исследование сваи методом заряда (Mise-a-la-masse метод)...	129
Рис. 4.11	Схема проведения измерений методом сопротивлений в параллельной скважине.....	130
Рис. 4.12	Результаты численного моделирования аномальных эффектов для свайного фундамента с учетом верхнего полупространства и свай различных конструкций .....	132
Рис. 4.13	Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам физического моделирования аномального эффекта от одиночной сваи .....	133
Рис. 4.14	Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам физического моделирования при одновременном измерении КС зондами различной длины на удалении $0,3 \cdot L$ от объекта исследования .....	134
Рис. 4.15	Физическое моделирование в двуслойной среде .....	136
Рис. 4.16	Исследуемые геотехнические условия в двухслойной геологической среде ( $\rho_1 > \rho_2$ ).....	137
Рис. 4.17	Результаты моделирования установкой MNB при положении геологической границы посередине сваи.....	139
Рис. 4.18	Результаты моделирования установкой AMN при совпадении геологической границы с концом сваи.....	141

- Рис. 4.19 Результаты моделирования установкой MNB при совпадении геологической границы с концом свай ..... 141
- Рис. 4.20 Схематичные графики электрического каротажа в модификации КЭП при определении заглубленной части свайного фундамента в двухслойной геологической среде ( $\rho_1 > \rho_2$ ) ..... 142
- Рис. 4.21 Вид зонда. Выполнение скважинных измерений ..... 146
- Рис. 4.22 Пример результатов скважинных опытно-методических работ по определению величины заглубленной части фундамента на застроенной территории ..... 146

### Список аббревиатур

АВБ	- агрегат вибрационного бурения
ЗАО «ГИДЭК»	- закрытое акционерное общество гидрогеологическая и геоэкологическая компания «ГИДЭК»
ВСЕГИНГЕО	- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии
ВЭЗ	- вертикальное электрическое зондирование
ГИС	- геофизические исследования скважин
ДОЗ	- дипольное осевое зондирование
ЕП	- метод естественного поля
ИВП РАН	- Институт водных проблем Российской академии наук
ИГЭ	- инженерно-геологический элемент
КС	- кажущееся сопротивление
КЭП	- комбинированное электропрофилирование
МГУ	- Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
НАЗ	- непрерывное электрическое зондирование на акваториях
НСП	- непрерывное сейсмическое профилирование
ООО НИПППД «Недра»	- Общество с ограниченной ответственностью Научно-исследовательское, проектное и производственное предприятие по природоохранной деятельности «Недра»
ПГНИУ	- Пермский государственный национальный исследовательский университет
ПК ВЭЗ	- пикет ВЭЗ
СПГУ	- Санкт-Петербургский горный университет
СПбГУ	- Санкт-Петербургский государственный университет
УГВ	- уровень грунтовых вод
УБШМ	- установка буровая шнековая малогабаритная
УРБ	- установка роторная буровая
УЭС	- удельное электрическое сопротивление
ФГМ	- физико-геологическая модель
ЭП	- электропрофилирование
ЭТ	- электротомография

## Введение

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 электротометрии постоянного тока. Методы электротометрии 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.

**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.

Одними из наиболее актуальных и требующих изучения направлений прикладной электротометрии при безопасном и рациональном освоении месторождений полезных ископаемых являются:

1. Исследования водных переходов линейных инженерных сооружений транспортной инфраструктуры осваиваемых месторождений углеводородного сырья;
2. Определение удельных электрических сопротивлений и петрофизических характеристик образцов дисперсных грунтов;
3. Определение величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений.

Актуальность исследования водных переходов обусловлена ограниченными возможностями прямых геологических методов, необходимостью повышения достоверности, оперативности исследований, с

одной стороны, и снижения затрат на «слепое» бурение за счет постановки буровых работ на участках, где происходит изменение геологических условий, с другой.

В рамках петрофизического подхода, определение удельных электрических сопротивлений образцов дисперсных грунтов позволяет увязать результаты полевых и лабораторных исследований, что является актуальным при решении широкого круга задач: районирования территории, определения петрофизических характеристик отложений, подсчета площади и объемов грунтов различного литологического состава, прогнозирования изменения их физических свойств, технико-экономической оценке и т.д. Основным направлением исследований также является повышение оперативности и снижение трудозатрат процесса измерений.

Задача определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений возникает на стадиях их строительства, эксплуатации, реконструкции и ликвидации. Актуальность исследований обусловлена сложностью решения данной задачи в различных геологических условиях, поскольку существуют ситуации, в которых проведение прямых методов исследований невозможно, а поверхностных геофизических – затруднительно.

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.

**Основная идея исследований** заключается в изучении 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.

**Целью** настоящей работы является разработка технологии электрометрии на постоянном токе из трех взаимосвязанных методик исследований для оценки инженерно-геологических условий, направленной на обеспечение рационального и безопасного недропользования.

Технология объединяет в себе три указанных выше направления исследований. Для ее реализации, согласно актуальным направлениям, перед автором ставились следующие основные **задачи**:

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.

Таким образом, технология состоит из трех взаимосвязанных методик, вынесенных в **защищаемые положения**:

1. Методика исследования водных переходов, основанная на результатах электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность исследований.

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.

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.

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.

Для решения поставленных задач использованы следующие **методы исследований:**

- численное и физическое моделирование полей постоянного тока;
- эксперименты и натурные электрометрические наблюдения;
- лабораторные исследования удельного электрического сопротивления монолитов и рядовых проб дисперсных грунтов;
- корреляционный анализ результатов измерений.

**Научная новизна** выполненных исследований заключается в следующем:

- 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;

– 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;

– 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**

– 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 углеводородов через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору, Харьягу.

– 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-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского.

– 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».

### **Апробация и реализация результатов исследований**

Реализация результатов научно-исследовательской деятельности выполнена в ходе опытно-методических и производственных работ в Научно-исследовательском проектном и производственном предприятии по природоохранной деятельности ООО НИПППД «Недра». Представленная технология электрометрии применялась при оценке инженерно-геологических условий для обеспечения рационального и безопасного освоения месторождений углеводородного сырья в Пермском крае, Коми Республике, Республике Саха (Якутии), а также для воспроизводства минерально-сырьевой базы при поисках месторождений грунтовых строительных материалов в Тюменской области. Геологические исследования выполнялись для предприятий ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО "ЛУКОЙЛ-Коми", ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Транснефть», ОАО «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».

### **Публикации**

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).

### **Объем и структура 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.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в теоретическом обосновании, разработке и практическом применении технологии электрметрии. 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. В рамках деятельности предприятия принимал участие в получении материалов, необходимых для проектирования обустройства, рационального и безопасного освоения месторождений полезных ископаемых.

## **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 НИППППД «Недра», д.г.-м.н., профессора В.В. Середина; д.т.н., профессора кафедры геофизики ПГНИУ В.А. Гершанока; 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 НИППППД «Недра» за всестороннюю помощь и поддержку.

## ГЛАВА 1

### **Методика уточнения инженерно-геологических условий на участках переходов инженерных сооружений через водные преграды методами электрметрии**

В главе 1 приводится обоснование первого защищаемого положения: *«Методика исследования водных переходов, основанная на результатах электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность исследований»* [6, 7, 8, 10, 11].

#### **1.1 Анализ информации по применению методов электрметрии при исследовании акваторий**

Аквальная электрметрия имеет более чем полувековую историю. Однако только в последние годы она сформировалась как эффективный метод инженерно-геологических изысканий (А.А. Огильви, 1990).

Отличие «водной» электрметрии от «сухопутной» определяется, в первую очередь, наличием слоя воды, в толще которого электроды могут свободно перемещаться и располагаться на любой заданной глубине. При этом заземления остаются почти неизменными и характеризуются почти идеальным, то есть приближающимся к единице, коэффициентом прилегания поверхности электрода к окружающей жидкой среде. Таким образом, создаются благоприятные предпосылки для проведения непрерывных измерений. Не вызывает затруднения и использование мощных источников электрического тока, которые или стационарно располагаются на берегу, или монтируются на судах и других плавсредствах и легко на них транспортируются. В сочетании с малыми переходными сопротивлениями заземлений это дает возможность создавать значительно более интенсивные, чем на суше, электромагнитные поля, что при измерениях обеспечивает благоприятное соотношение сигнал-помеха. Выдержанность сопротивления первого слоя, мощность которого известна по батиметрическим измерениям, упрощает интерпретацию получаемых результатов. Таким образом,

существующие условия несут благоприятные предпосылки для использования электрометрических методов при исследовании акваторий.

В рамках инженерно-геологических изысканий геофизические методы на акваториях должны и позволяют решать следующие задачи:

- расчленение прибрежных и донных осадков по литологии, возрасту, условиям осадконакопления;
- определение глубины залегания коренных пород или мощности современных осадков;
- восстановление палеогеографических условий формирования берегов, бухт, заливов и петрофизических свойств горных пород;
- картирование тектонических нарушений, зон трещиноватости и закарстованности;
- решение геокриологических задач на участках развития мерзлых грунтов;
- изучение физико-механических, прочностных и водно-физических свойств горных пород в массиве и на образцах;
- анализ связи подземных вод на суше с водами окружающих акваторий;
- оценка экологической обстановки.

Решение этих задач может проводиться на различных стадиях изысканий под строительство, в ходе технического проектирования, эксплуатации и ликвидации сооружений.

В России теоретические особенности, методические рекомендации, аппаратное обеспечение, опыт и результаты исследований на акваториях наиболее полно освещены в работах коллективов научно-исследовательских и учебных организаций МГУ, ИВП РАН, ВСЕГИНГЕО, ЗАО «ГИДЭК». Теоретической и методической базой в России, на сегодняшний момент, продолжают оставаться разработки геологического факультета МГУ.

Современные тенденции применения электроразведочных методов в рамках инженерно-геологических изысканий для решения геолого-гидрогеологических и экологических задач при исследовании рек и водоемов сводятся к следующему:

1. Комплекс инженерно-геологических изысканий акваторий должен включать инженерно-геологическое картирование, геофизические исследования, бурение скважин и ГИС, проходку разведочных горных выработок и отбор образцов для лабораторных исследований;

2. На прибрежных участках акваториальные исследования сочетаются с наземными и скважинными геофизическими исследованиями;

3. Реализация целевых или технологических комплексов, в которых метод сопротивлений (ВЭЗ, ДОЗ, ЭТ, ЭП) рекомендуется комбинировать с непрерывным сейсмическим профилированием (НСП), ЕП, термометрией, резистивиметрией, георадиолокацией. Измерение нескольких геофизических параметров с одного движущегося судна, при этом во много раз сокращает стоимость и время проведения изысканий;

4. Наблюдения методом сопротивлений могут проводиться с поверхности или со дна водоемов. В некоторых случаях электроды могут помещать во внутренних точках водной среды;

5. В пределах живых русел рек, в зависимости от поставленных задач и существующих условий, разработан ряд специальных приемов с использованием различных установок зондирования. Локализация и определение размеров небольших малококонтрастных объектов рекомендуется с применением установок ДОЗ. При картировании геологических тел применяют трехэлектродные зондирования. Расчленение пологозалегающей слоистой среды чаще всего осуществляется зондированиями симметричными установками;

6. При переходах через малые реки и ручьи рекомендуется выполнять электрические зондирования с шагом 10 м или электротомографические работы с шагом 3 м и многоэлектродной косой. В

зимнее время года рекомендуется проводить электрические зондирования со льда путем бурения лунок и производства электрических зондирований с постоянным шагом по разносам. Наиболее приемлемым является шаг по разносам 5 м. При переходах через крупные реки рекомендуется выполнять по берегам вертикальные электрические зондирования с шагом 10 м, на акваториях рек выполнять электрические зондирования с плавающей/донной электроразведочной косой (В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.А. Бобачев и др.) [16, 17, 21, 26, 56, 81]. Однако параметры съемочной сети и параметры установок определяются конкретной инженерно-геологической обстановкой;

7. Измерения многоэлектродными установками с использованием косы могут проводиться в движении при непрерывном режиме регистрации (НАЗ). Результаты наблюдений в автоматическом режиме обрабатываются с помощью алгоритмов 2D/3D инверсии (А.Е. Каминский, М.Н. Loke).

Согласно проведенному анализу информации, наблюдения со дна водоемов являются целесообразными в сложных инженерно-геологических условиях. Преимущества применения донных наблюдений, особенно если речь идет об акваториях с большой мощностью водной толщи, заключаются в повышении вертикальной разрешающей способности геофизических исследований. Многоэлектродные непрерывные зондирования позволяют получать геолого-гидрогеологическую информацию с высокой детальностью при сравнительно невысокой, относительно прямых методов исследования, стоимости работ. Полевые наблюдения могут выполняться с регистрацией, по детальности сопоставимой с каротажем, что облегчает анализ и геолого-гидрогеологическую интерпретацию получаемой информации.

Однако, в опубликованной литературе (в том числе и в зарубежной) встречается крайне мало детальных примеров применения донных наблюдений, раскрывающих особенности этапов полевых работ, обработки и интерпретации. В то время как, проведение донных наблюдений связано со следующими трудностями:

- физико-математическая теория электромагнитного поля, создаваемого погруженными электродами, сложнее, чем в случае, когда они располагаются на поверхности проводящего полупространства;
- необходимо достоверное расчленение и определение свойств тонкослоистых придонных отложений;
- водная толща оказывает влияние на результаты измерений, существуют разнообразные помехи, возникающие, главным образом, за счет динамических процессов в водной среде;
- донные установки в отношении глубинности при небольшой мощности водного слоя не обладают заметными преимуществами [57].
- применение ставших популярными аппаратов автоматической 2D/3D инверсии связано с процессом получения трансформанты поля кажущихся сопротивлений (КС), при котором интерпретатор имеет малую возможность контролировать автоматический процесс решения обратной задачи и снижать степени ее неоднозначности;
- получаемая в ходе автоматической инверсии геоэлектрическая модель среды характеризуется большей интегральностью в сравнении с результатами одномерной интерпретации. То есть отсутствуют четкие границы между геоэлектрическими слоями, необходимые при выделении кровли/подошвы инженерно-геологических элементов (ИГЭ) и более точного определения их свойств;
- наблюдаются искажения поля удельных электрических сопротивлений, связанные с краевыми, компенсационными эффектами и другими особенностями алгоритмов расчета.

Целесообразность выполнения донных наблюдений в сложных инженерно-геологических условиях при инженерно-геологических изысканиях не вызывает вопросов. Однако применение детальных томографических наблюдений с использованием многоэлектродных кос может быть ограничено техническими, экономическими, погодными,

климатическими условиями. Решение поставленных задач с сохранением требуемой детальности в ограниченных условиях может быть выполнено с использованием донных наблюдений классическим методом ВЭЗ. На одном из этапов интерпретации ВЭЗ может быть применен аппарат автоматической инверсии.

В связи с этим, для повышения оперативности выполнения наблюдений и достоверности решения вопросов интерпретации в сложных инженерно-геологических условиях требуется проведение научных исследований.

## **1.2 Трехмерное численное моделирование**

На первом этапе исследований выполнено трехмерное численное моделирование в программе А.Е. Каминского ZondRez3D [43].

Целью численного моделирования являлась оценка влияния водной толщи на результаты донных наблюдений и разрешающую способность при исследовании тонкослоистых сред.

В задачи трехмерного моделирования входило построение семи геоэлектрических моделей (таблица 1.1) и анализ результатов решения прямой задачи. Параметры геоэлектрических моделей выбраны исходя из прогнозируемых инженерно-геологических условий на одном из участков исследований.

Моделирование выполнено с использованием 4-х электродной симметричной измерительной установки Шлюмберже AMNB. Полуразнос АО изменялся от 2 до 28 м с арифметическим шагом 1 м. Установка располагалась на поверхности водной толщи и во внутренних точках среды на глубине 7 м – на дне. После решения прямой задачи в программе «Зонд» (В.П. Колесников, В.А. Кутин, С.В. Мокронос) [47] с учетом априорной информации выполнена 1D количественная интерпретация кривых КС, вычисленных в ходе моделирования. В качестве последней использованы данные о мощности водного слоя и его сопротивлении, которые можно получить на этапе полевых работ с помощью батиметрии или измерения глубины погружения электродов

и резистивиметрии. Ниже представлено описание моделей и анализ результатов решения прямой задачи. При выполнении анализа результатов трехмерного численного моделирования погрешности определения сопротивления и мощности слоев оценивались сравнением количественных характеристик, полученных в ходе интерпретации рассчитанных модельных кривых, с изначально заданными параметрами геоэлектрической модели.

Таблица 1.1

## Трехмерные численные модели

№ модели	Тип	Водная толща		Донные отложения			
		Слой 1		Слой 2		Слой 3	
		$\rho_1$ , Ом·м	$h_1$ , м	$\rho_2$ , Ом·м	$h_2$ , м	$\rho_3$ , Ом·м	$h_3$ , м
I	Однородная	30	7	30	13	-	-
II	Двухслойная ( $\rho_1 < \rho_2$ )	30	7	150	13	-	-
III	Двухслойная ( $\rho_1 > \rho_2$ )	30	7	10	13	-	-
IV	Трехслойная (Н)	30	7	10	2	30	11
V	Трехслойная (К)	30	7	150	2	30	11
VI	Трехслойная (А)	10	7	30	2	150	11
VII	Трехслойная (Q)	60	7	30	2	10	11

*Модель–I (однородная).* Первый слой модели сопротивлением 30 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,2 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым слоем сопротивлением 30 Ом·м и мощностью 13 м (рис. 1.1, а, б). Модель необходима для проверки работоспособности программы и едва ли встречается в реальных условиях.

Результаты моделирования на поверхности и внутри однородной среды представлены двумя прямолинейными кривыми кажущегося сопротивления значением 30 Ом·м (рис. 1.1, в). При визуализации результатов решения прямой задачи со дна учтена глубина погружения донной установки, которая составляет 7 м. Прямолинейный характер кривых КС и их совпадение на отметке 30 Ом·м при решении прямой задачи на поверхности и внутри

однородной модели среды говорит о корректной работе программы и достоверности получаемых результатов моделирования.

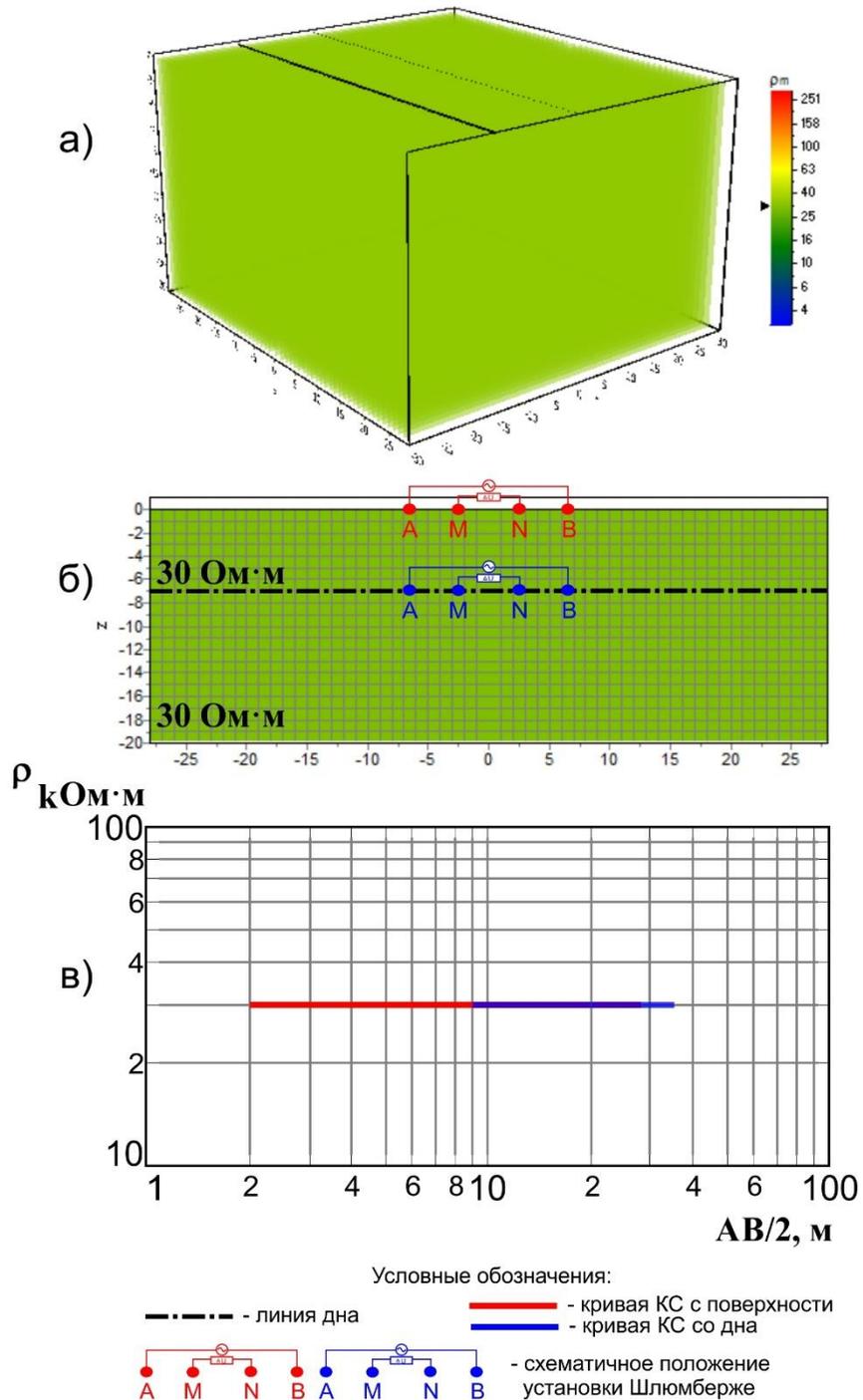


Рис. 1.1 Результаты 3D моделирования в однородной среде сопротивлением  $\rho=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ : а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

*Модель-II (двухслойная  $\rho_1 < \rho_2$ ).* Первый слой модели сопротивлением 30 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,2 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым слоем сопротивлением 150 Ом·м и мощностью 13 м (рис. 1.2, а, б). С геологической точки зрения второй слой может быть сложен прирусловыми песчано-гравийными грунтами.

Результаты моделирования представлены двухслойными кривыми КС. Водная толща влияет на результаты донных наблюдений и проявляется на донной кривой занижением левой ветви. Первый разнос левой ветви донной кривой выходит на асимптоту со значением 50 Ом·м. Правая асимптота кривой со дна также лежит несколько выше, чем правая асимптота кривой с поверхности (рис. 1.2, в). Результаты количественной интерпретации модельных кривых представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

## Результаты количественной интерпретации кривых КС

*модели-II (двухслойная  $\rho_1 < \rho_2$ )*

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1$ , Ом·м	30	30
	$h_1$ , м	6,2	7
	$\delta\rho_1$ , %	0	0
	$\delta h_1$ , %	11	0
Слой 2	$\rho_2$ , Ом·м	137	148
	$\delta\rho_2$ , %	9	1,5

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

По результатам количественной интерпретации относительная погрешность определения удельного электрического сопротивления второго

слоя  $\delta\rho_2$  со дна и с поверхности соответственно составляет 1,5 и 9%. Донные наблюдения позволяют более точно определить сопротивление второго слоя.

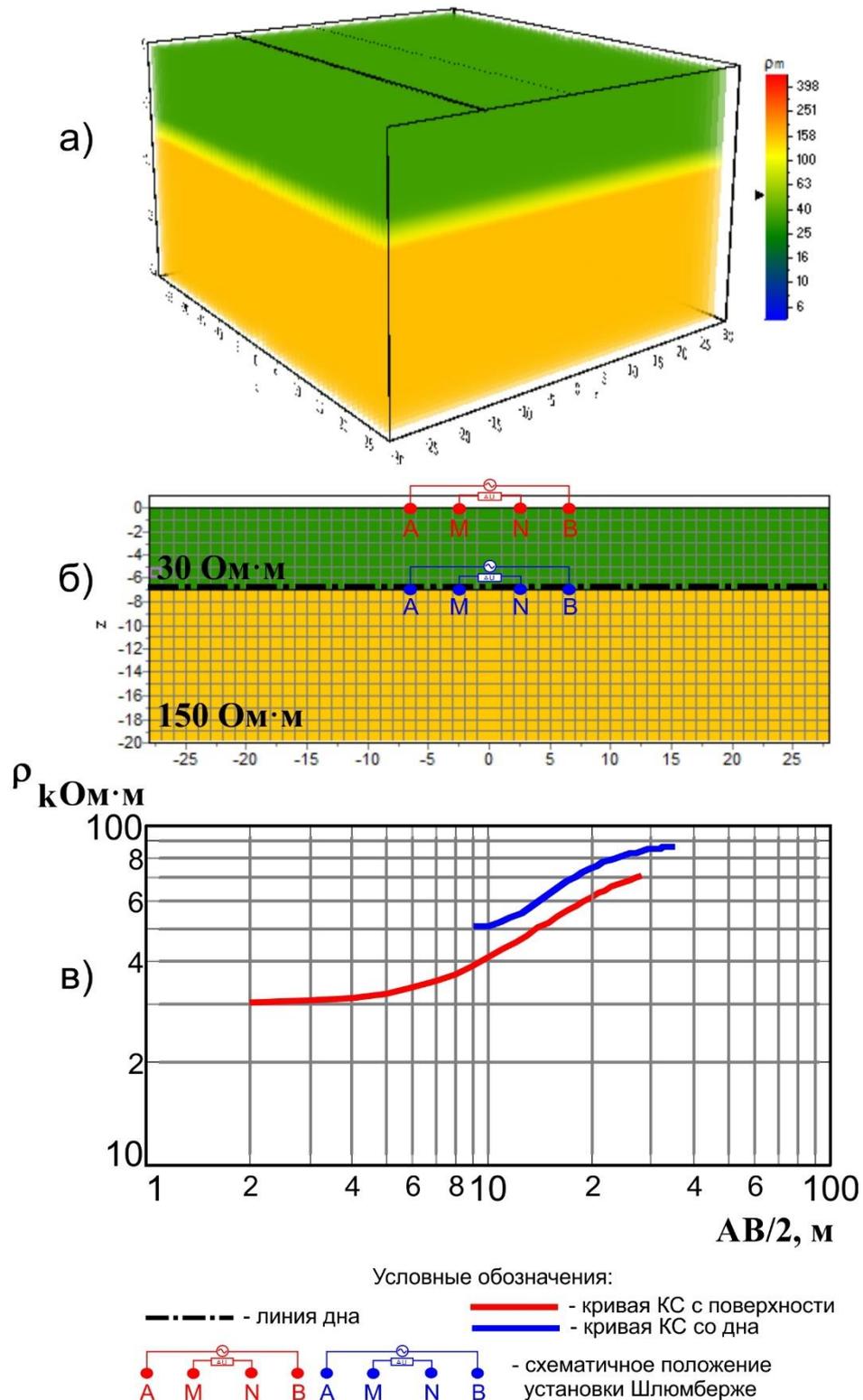


Рис. 1.2 Результаты 3D моделирования в двухслойной среде ( $\rho_1=30$  Ом·м,  $\rho_2=150$  Ом·м): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

*Модель–III (двухслойная  $\rho_1 > \rho_2$ ).* Первый слой модели сопротивлением 30 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,2 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым слоем сопротивлением 10 Ом·м и мощностью 13 м (рис. 1.3, а, б). С геологической точки зрения второй слой может быть сложен прирусловыми глинистыми отложениями.

Результаты моделирования представлены двухслойными кривыми КС. Водная толща влияет на результаты донных наблюдений и проявляется на донной кривой завышением левой ветви. Первый разнос левой ветви донной кривой выходит на асимптоту со значением сопротивления 15 Ом·м. Кривая со дна быстрее выходит на асимптоту второго слоя, чем кривая с поверхности (рис. 1.3, в). Результаты количественной интерпретации модельных кривых представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

## Результаты количественной интерпретации кривых КС

*модели-III (двухслойная  $\rho_1 > \rho_2$ )*

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1$ , Ом·м	30	26
	$h_1$ , м	6,9	7
	$\delta\rho_1$ , %	0	13
	$\delta h_1$ , %	1,5	0
Слой 2	$\rho_2$ , Ом·м	8,2	9
	$\delta\rho_2$ , %	18	10

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

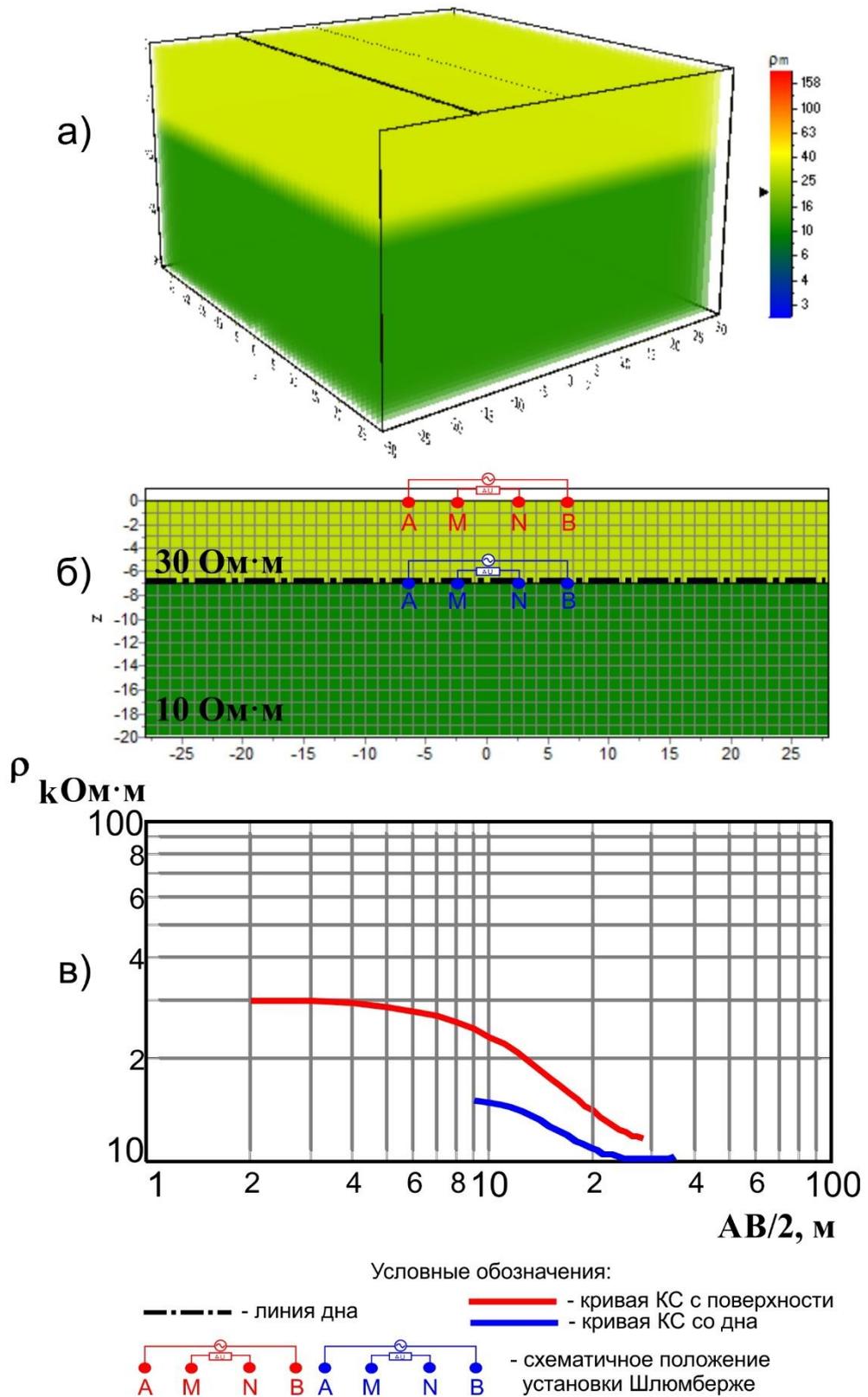


Рис. 1.3 Результаты 3D моделирования в двухслойной среде ( $\rho_1=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

В ходе одномерной количественной интерпретации донной кривой не удалось более точно подобрать сопротивление первого (водного) слоя, что, однако, не столь критично при определении литологического состава русловых отложений и оценки инженерно-геологических условий. Напротив, по результатам интерпретации относительная погрешность определения удельного электрического сопротивления второго слоя  $\delta\rho_2$  со дна меньше, чем с поверхности, и соответственно составляет 10 и 18%. Донные наблюдения также позволили более точно определить сопротивление второго слоя.

Выполнено сравнение полученных в ходе 3D численного моделирования кривых КС с номограммой двуслойных кривых ВЭЗ для поверхностной и донной установок, разработанной в ЗАО «ГИДЭК» (рис. 1.4) [56]. В ходе сравнительного анализа выявлено: значения асимптот модельных кривых и кривых номограммы совпадают, что является ключевым моментом при дальнейшем определении сопротивления второго слоя. Однако модельные кривые быстрее выходят на асимптотику второго слоя, угол наклона полученных кривых и кривых номограммы отличается. Различие может быть связано с особенностями алгоритма расчета, заложенного в программе 3D моделирования.

На следующем этапе для изучения особенностей электрического поля постоянного тока в трехслойных средах выполнено построение и анализ моделей IV – VII. Особенностью моделей является небольшая мощность второго слоя, которая составляет 2 м. Мощность второго слоя выбраны согласно имеющейся априорной информации о геологическом строении одного из участков дальнейших исследований.

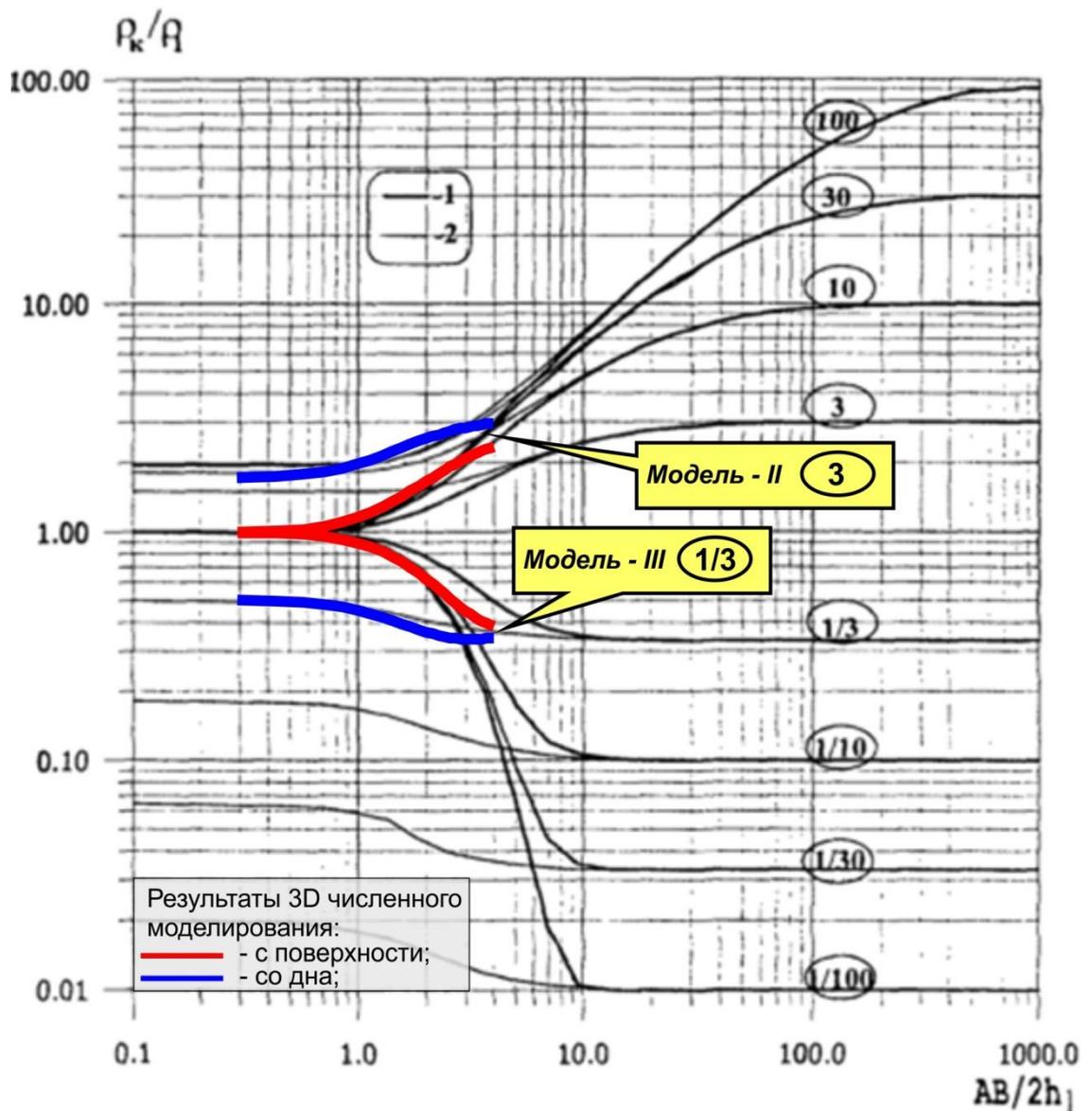


Рис. 1.4 Номограмма двухслойных кривых ВЭЗ для поверхностной и донной установок [56] с нанесенными результатами 3D численного моделирования (1 – поверхность воды, 2 – дно, цифра в эллипсе – отношение УЭС донных отложений и воды)

*Модель-IV (трехслойная типа H).* Первый слой модели сопротивлением 30 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,2 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым и третьим слоем. Второй слой обладает сопротивлением 10 Ом·м и мощностью 2 м, третий – сопротивлением 30 Ом·м и мощностью 11 м

(рис. 1.5, а, б). С геологической точки зрения второй и третий слои могут быть представлены приуроченными отложениями глины и суглинка соответственно.

Результаты моделирования с поверхности представлены в виде двухслойной кривой КС, на которой второй проводящий слой модели, ввиду малой мощности, не проявляется. Полученная кривая со дна также имеет вид двухслойной, но характер кривой указывает на наличие второго проводящего слоя и третьего слоя относительно повышенного сопротивления. На кривой со дна для данной модели слой, характеризующий водную толщу, отсутствует (рис. 1.5, в). Результаты количественной интерпретации кривых представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Результаты количественной интерпретации кривых КС  
модели-IV (трехслойная типа H)

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1$ , Ом·м	30	по кривой не выделяется
	$h_1$ , м	6	
	$\delta\rho_1$ , %	0	
	$\delta h_1$ , %	14	
Слой 2	$\rho_2$ , Ом·м	21 (интегральный слой) $\delta\rho_1=6\%$	11,5
	$h_2$ , м		2
	$\delta\rho_2$ , %		15
	$\delta h_2$ , %		0
Слой 3	$\rho_3$ , Ом·м		30
	$\delta\rho_3$ , %		0

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

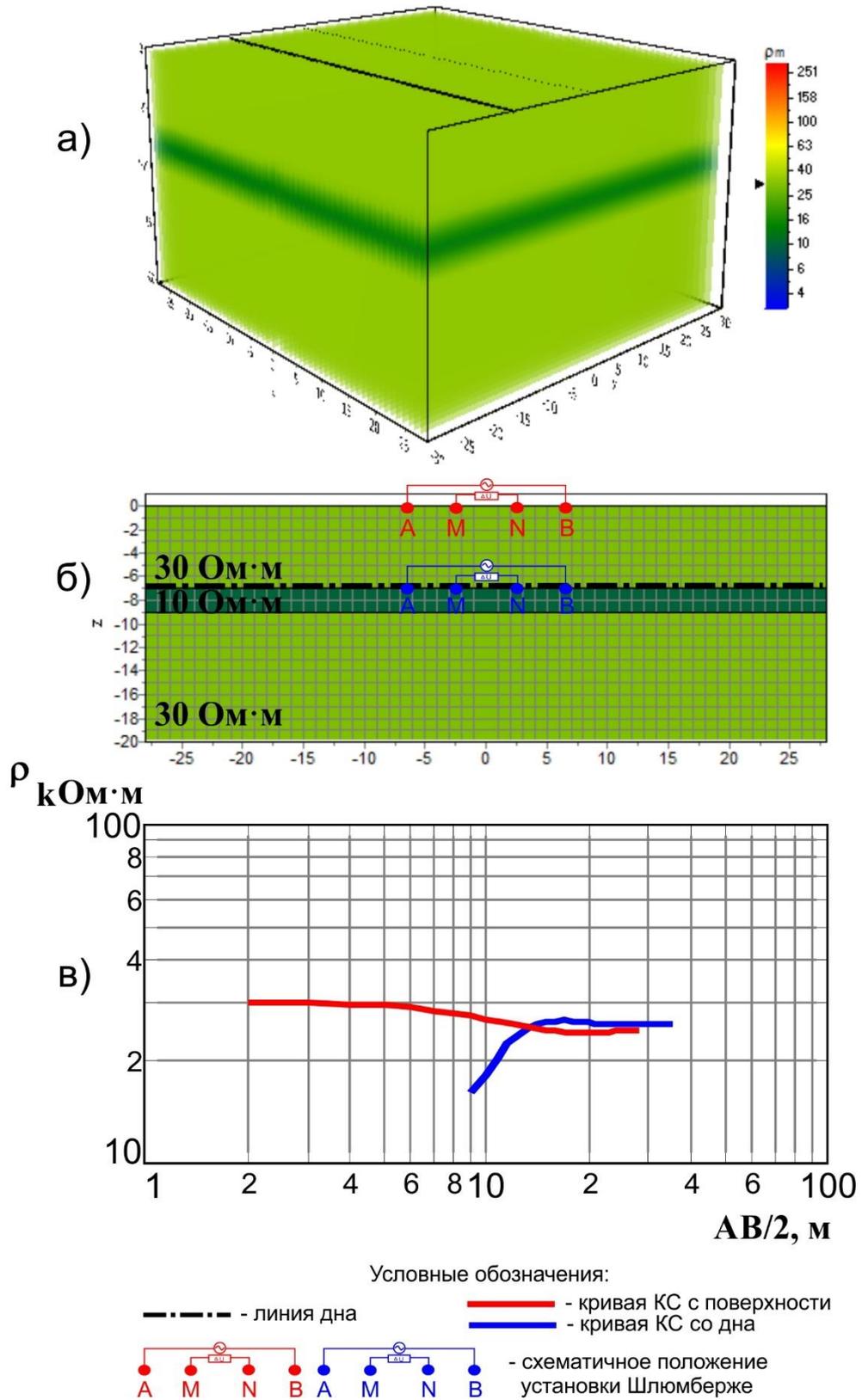


Рис. 1.5 Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа Н ( $\rho_1=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой с поверхности выделено два геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства водной толщи: УЭС соответствует заданному значению в модели, погрешность определения мощности составляет 14 %. Второй геоэлектрический горизонт является интегральным и характеризует свойства толщи, объединяющей второй и третий слои модели среды. УЭС второго горизонта соответствует среднему продольному удельному электрическому сопротивлению интегральной толщи с погрешностью определения 6%. В качестве самостоятельного геоэлектрического горизонта второй проводящий слой модели среды по кривой с поверхности не выделяется.

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой со дна также выделяется два геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства проводящего слоя модели среды – первого слоя русловых отложений, погрешность определения сопротивления составляет 15 %. Второй горизонт характеризует свойства третьего слоя модели среды; определенное в ходе количественной интерпретации УЭС соответствует заданному значению. Водная толща для данной модели среды в качестве самостоятельного геоэлектрического горизонта по кривой не выделяется, что является не столь критичным при определении свойств прирусловых отложений. Донные наблюдения позволили более точно расчленить прирусловые отложения, определить наличие и количественные параметры второго проводящего слоя малой мощности.

*Модель–V (трехслойная типа K).* Первый слой модели сопротивлением 30 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,2 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым и третьим слоем. Второй слой обладает сопротивлением 150 Ом·м и мощностью 2 м, третий – сопротивлением 30 Ом·м и мощностью 11 м (рис. 1.6, а, б). С геологической точки зрения второй и третий слои могут быть

представлены приуроченными песчано-гравийными и глинистыми грунтами соответственно.

Результаты моделирования с поверхности представлены в виде двухслойной кривой КС, на которой второй высокоомный слой модели, ввиду малой мощности, не проявляется. Полученная кривая со дна, напротив, имеет вид трехслойной, характер кривой указывает на наличие второго высокоомного слоя и третьего слоя относительно пониженного сопротивления (рис. 1.6, в). Наблюдается завышение (искажение) первого разноса левой ветви донной кривой. Результаты количественной интерпретации кривых представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Результаты количественной интерпретации кривых КС  
модели-V (трехслойная типа К)

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1$ , Ом·м	30	33
	$h_1$ , м	4,5	7
	$\delta\rho_1$ , %	0	10
	$\delta h_1$ , %	35	0
Слой 2	$\rho_2$ , Ом·м	50 (интегральный слой) $\delta\rho_t=4\%$	160
	$h_2$ , м		3,9
	$\delta\rho_2$ , %		7
	$\delta h_2$ , %		95
Слой 3	$\rho_3$ , Ом·м		43
	$\delta\rho_3$ , %		43

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

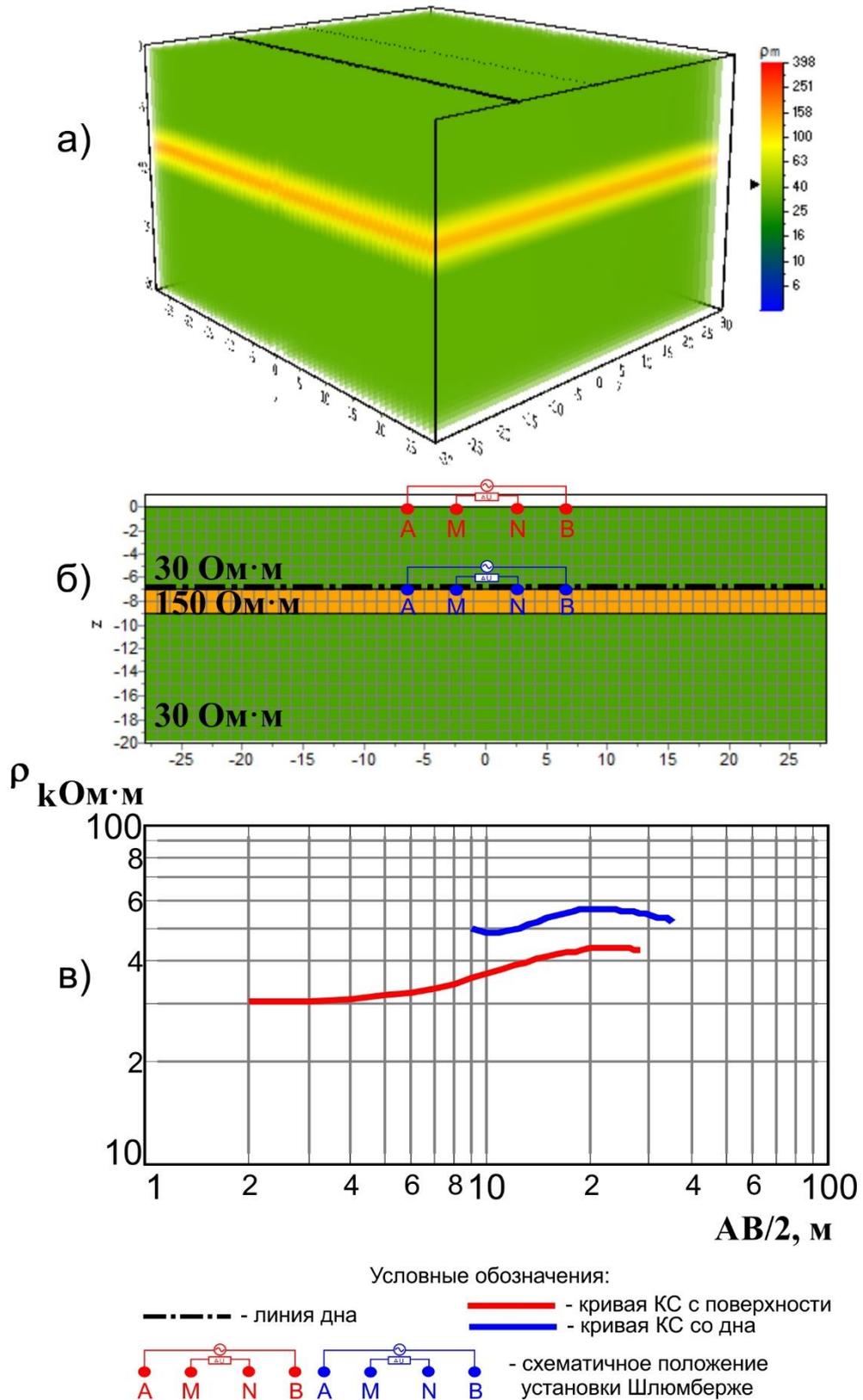


Рис. 1.6 Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа К ( $\rho_1=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой с поверхности выделено два геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства водной толщи: УЭС соответствует заданному значению в модели, погрешность определения мощности составляет 35 %. Второй геоэлектрический горизонт является интегральным и характеризует свойства толщи, объединяющей второй и третий слои модели среды. УЭС второго горизонта соответствует среднему поперечному удельному электрическому сопротивлению интегральной толщи с погрешностью определения 4%. В качестве самостоятельного геоэлектрического горизонта второй высокоомный слой модели среды по кривой с поверхности не выделяется.

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой со дна выделяется три геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства водной толщи, погрешность определения сопротивления составляет 10 %. Второй горизонт характеризует свойства второго высокоомного слоя модели среды: погрешность определения сопротивления составляет 7 %, погрешность определения мощности, ввиду интегрального характера кривой КС, принципа учета информационных возможностей метода, влияния водной толщи и перераспределения плотности тока во внутренних точках среды, составляет 95 %. По кривой со дна удалось более точно расчленить прирусловые отложения, определить наличие и электрические свойства второго высокоомного слоя малой мощности.

*Модель–VI (трехслойная типа А).* Первый слой модели сопротивлением 10 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,6-0,7 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым и третьим слоем. Второй слой обладает сопротивлением 30 Ом·м и мощностью 2 м, третий – сопротивлением 150 Ом·м и мощностью 11 м (рис. 1.7, а, б). С геологической точки зрения второй и третий слои могут быть представлены прирусловыми отложениями суглинка и песчано-гравийными грунтами соответственно.

Результаты моделирования с поверхности и со дна представлены в виде двухслойных кривых КС, на которых второй слой модели, ввиду малой мощности, при заданных значениях УЭС не проявляется (рис. 1.7, в). При погружении установки на дно отмечается влияние водной толщи, эквивалентное модели-II и проявляющееся в завышение асимптоты левой ветви. Асимптота правой ветви донной кривой лежит выше, чем соответствующая асимптота кривой с поверхности. Результаты количественной интерпретации кривых представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

## Результаты количественной интерпретации кривых КС

*модели-VI (трехслойная типа А)*

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1$ , Ом·м	9,9	8,2
	$h_1$ , м	6,4	7
	$\delta\rho_1$ , %	1	18
	$\delta h_1$ , %	9	0
Слой 2	$\rho_2$ , Ом·м	69 (интегральный слой) $\delta\rho_1=26\%$	92 (интегральный слой) $\delta\rho_1=1\%$
	$h_2$ , м		
	$\delta\rho_2$ , %		
	$\delta h_2$ , %		
Слой 3	$\rho_3$ , Ом·м		
	$\delta\rho_3$ , %		

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

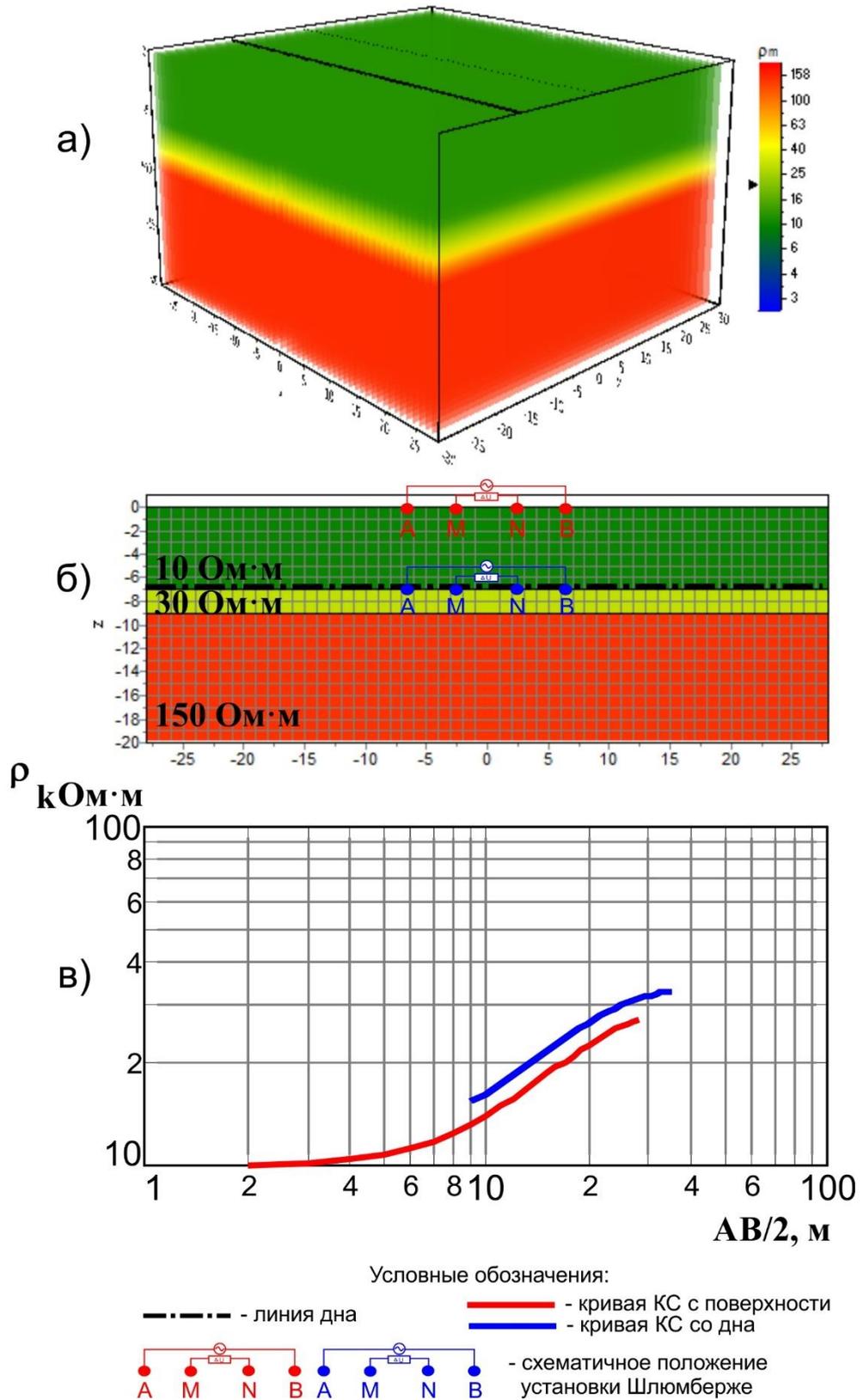


Рис. 1.7 Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа А ( $\rho_1=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

В ходе одномерной количественной интерпретации кривых выделено два геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства водной толщи: относительная погрешность определения УЭС по кривой со дна больше, мощности – меньше, чем по кривой с поверхности. Второй геоэлектрический горизонт является интегральным и характеризует свойства толщи, объединяющей второй и третий слои модели среды. УЭС второго горизонта соответствует среднему продольному удельному электрическому сопротивлению интегральной толщи. По кривой со дна этот обобщенный параметр слоистой толщи определяется точнее, чем по кривой с поверхности. В качестве самостоятельного геоэлектрического горизонта при заданных параметрах модели среды второй слой модели промежуточного сопротивления по кривым не выделяется.

*Модель–VII (трехслойная типа Q).* Первый слой модели сопротивлением 60 Ом·м характеризует водную толщу, минерализация воды порядка 0,1 г/л. Мощность водного слоя составляет 7 м. Донные отложения представлены вторым и третьим слоем. Второй слой обладает сопротивлением 30 Ом·м и мощностью 2 м, третий – сопротивлением 10 Ом·м и мощностью 11 м (рис. 1.8, а, б). С геологической точки зрения второй и третий слои могут быть представлены прирусловыми отложениями суглинка и глинистыми грунтами соответственно.

Результаты моделирования с поверхности представлены в виде двухслойной кривой КС, на которой второй слой модели, ввиду малой мощности при заданных значениях УЭС, не проявляется (рис. 1.8, в). При моделировании со дна получена трехслойная кривая КС. Асимптота левой ветви, ввиду влияния водной толщи во внутренних точках среды, занижена, ситуация эквивалентна модели-III. По кривой наблюдается наличие «ложного» слоя, что может быть связано с особенностями алгоритма расчета программы, влиянием компенсационных или краевых эффектов. Результаты количественной интерпретации кривых представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Результаты количественной интерпретации кривых КС  
*модели-VII (трехслойная типа Q)*

Результаты интерпретации		С поверхности	Со дна
Слой 1	$\rho_1, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	60	60
	$h_1, \text{ м}$	7,2	7
	$\delta\rho_1, \%$	0	0
	$\delta h_1, \%$	3	0
Слой 2	$\rho_2, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	7,9 (интегральный слой) $\delta\rho_1=29\%$	11 (наличие «ложного» слоя) $\delta\rho_1=1\%$
	$h_2, \text{ м}$		
	$\delta\rho_2, \%$		
	$\delta h_2, \%$		
Слой 3	$\rho_3, \text{ Ом}\cdot\text{м}$		
	$\delta\rho_3, \%$		

$\delta$  – относительная погрешность определения параметров среды по результатам 1D количественной интерпретации

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой с поверхности выделено два геоэлектрических горизонта. Первый характеризует свойства водной толщи, погрешность определения количественных параметров не превышает первых процентов. Вторым геоэлектрическим горизонтом является интегральным и характеризует свойства толщи, объединяющей второй и третий слои модели среды. УЭС второго горизонта соответствует среднему продольному удельному электрическому сопротивлению интегральной толщи, относительная погрешность определения составляет 29%.

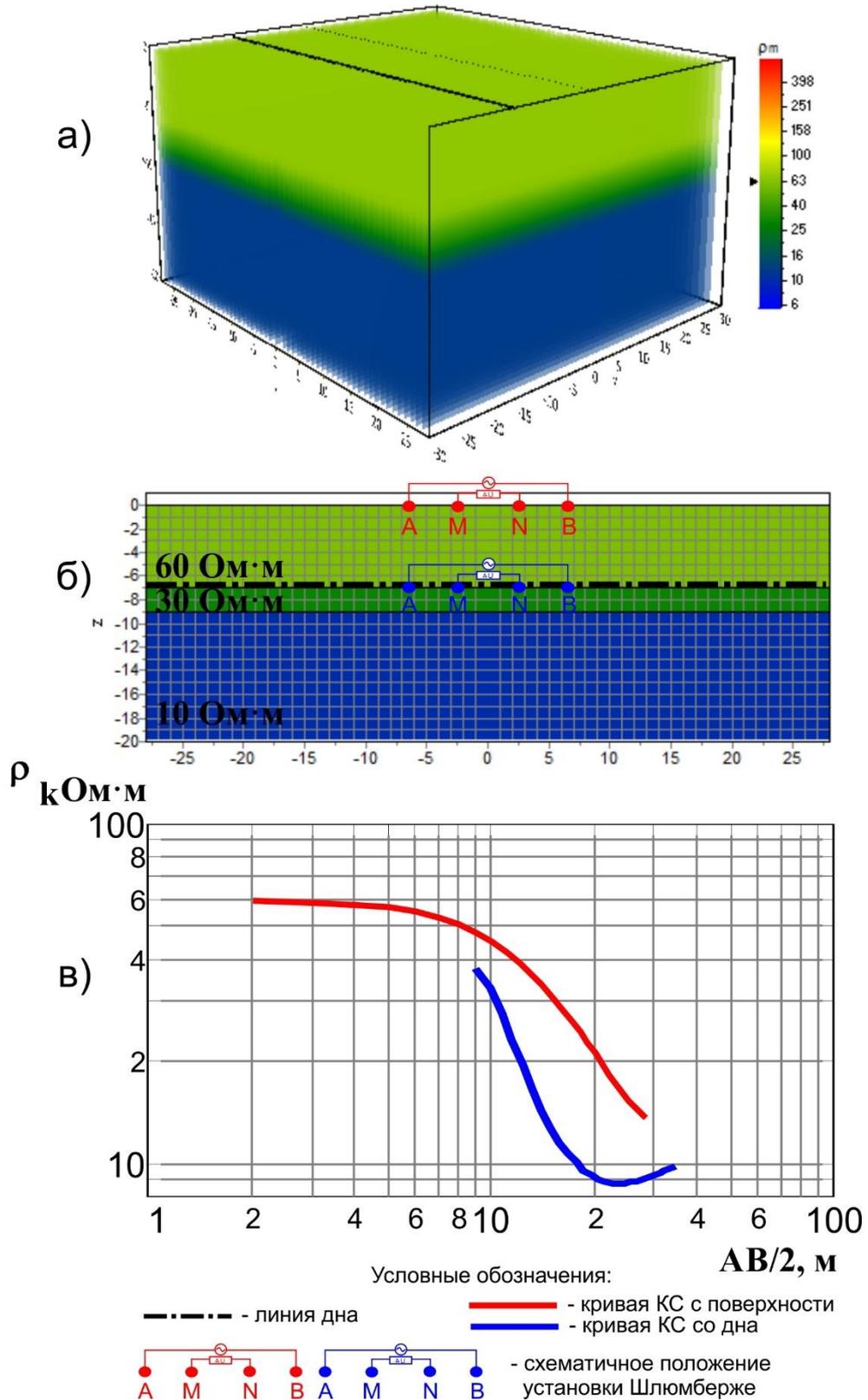


Рис. 1.8 Результаты 3D моделирования в трехслойной среде типа Q ( $\rho_1=60 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_2=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_3=10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ): а) – трехмерное изображение модели среды, б) – геоэлектрический разрез, в) – вычисленные кривые КС

В ходе одномерной количественной интерпретации кривой со дна выделяется три геоэлектрических горизонта. Наблюдается наличие «ложного» слоя, связанного с особенностями алгоритма расчета кривой при решении прямой задачи. Однако, среднее продольное УЭС, определенное по геоэлектрической модели среды для толщи второго и третьего слоя в ходе интерпретации, соответствует  $\rho_1$  для заданной модели. В качестве самостоятельного геоэлектрического горизонта при заданных параметрах модели среды второй слой промежуточного сопротивления по кривым с поверхности и со дна не выделяется.

Обобщенные результаты численного моделирования сводятся к следующему:

- донные наблюдения подвержены влиянию водной толщи; результаты исследований согласуются с имеющими теоретическими представлениями, что дает возможность определять удельное электрическое сопротивление прирусловых отложений в двухслойных средах по имеющимся методическим рекомендациям;

- в тонкослоистых средах кривые донных наблюдений по сравнению с поверхностными обладают большей дифференциацией, что является ключевым моментом при расчленении тонкослоистой толщи;

- правая ветвь донных кривых КС быстрее выходит на асимптотические значения, что указывает на большую глубинность донных наблюдений;

- донные наблюдения позволяют точнее определять количественные параметры слоев и обобщенные параметры слоистых толщ.

Результаты численного моделирования подтверждают целесообразность проведения донных наблюдений для уточнения и оценки инженерно-геологических условий при малоглубинных исследованиях акваторий.

### 1.3 Методика исследования водных переходов

В ходе моделирования и опытно методических работ разработана методика исследования водных переходов в сложных инженерно-геологических условиях методами электрометрии. Установлено, что применение данной методики позволяет успешно решать 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.

Применение методики становится особенно целесообразным при выполнении исследований в зимний период времени. Преимущества методики заключаются, главным образом, в повышении разрешающей способности геофизических исследований, увеличении оперативности, снижения рисков и стоимости инженерных изысканий.

Ключевым моментом предлагаемой методики электроразведочных исследований является ее стадийность:

1. Проведение наземных наблюдений методом ВЭЗ по берегам акваторий;
2. Проведение акваториальных наблюдений методом ВЭЗ со дна акватории;
3. Проведение акваториальных наблюдений методом ВЭЗ с поверхности водоема;
4. Батиметрия, измерение температуры и сопротивления водной толщ для определения рельефа дна и минерализации воды;

5. Введение в полевые материалы на этапе обработки соответствующих поправок за влияние водного слоя;
6. Автоматическая экспресс интерпретация данных ВЭЗ с применением аппарата 3D инверсии;
7. Постановка буровых работ;
8. Построение окончательной геоэлектрической модели среды в системе 1D интерпретации [8].

### 1.3.1 Методика полевых наблюдений

Полевые наблюдения выполняются согласно первым четырем пунктам описанной выше методики исследований: проведение наблюдений методом ВЭЗ по берегам, со дна и с поверхности акватории, батиметрия, измерение температуры и сопротивления водной толщи.

Сетка разносов и шаг съемочной сети выбирается исходя из требуемой детальности и необходимой глубины исследования. Для получения качественных полевых данных могут быть использованы рекомендации по выбору этих параметров, изложенные в [16, 17, 21, 54, 56].

Перед выполнением русловых измерений для получения начального представления о геоэлектрических свойствах геологической среды на участке водного перехода требуется проведение исследований в прилегающих береговых частях водоема. Береговые наблюдения методом сопротивлений могут быть выполнены по стандартным (в зависимости от задачи) методикам – ВЭЗ, ЭТ, ЭП [41, 47, 54, 55, 56, 69, 78, 81, 85, 86].

Русловые наблюдения проводятся на двух уровнях: со дна и с поверхности акватории. Донные наблюдения выполняются с погружением заземлителей непосредственно в русловые отложения, поверхностные – с «заземлением» электродов на поверхности водной толщи. При проведении наблюдений установки зондирования размещаются вдоль линии уреза воды (поперек линии профиля), что позволяет снизить влияние рельефа дна и неоднородностей разреза (рис. 1.9, 1.10, а).

Проведение донных наблюдений позволяет обеспечить большую разрешающую способность и глубинность исследований, избежать искажения левой ветви кривой КС за счет влияния льда в зимний период времени, более точно определить количественные характеристики разреза (рис. 1.10, б, 1.11).

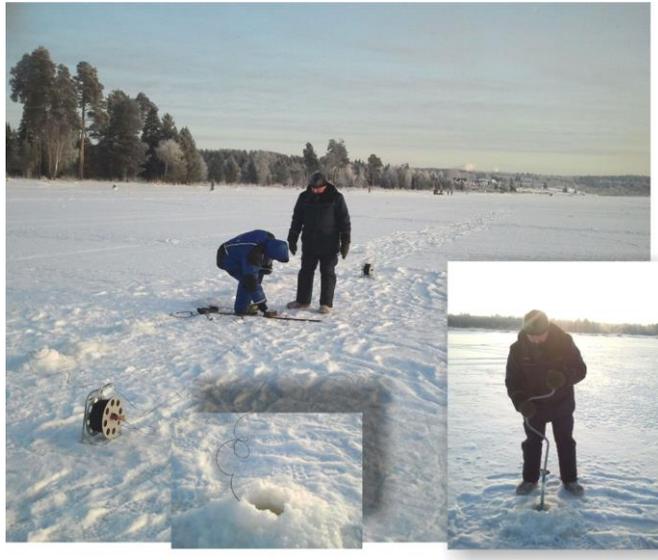


Рис. 1.9 Выполнение полевых работ при измерении со дна реки

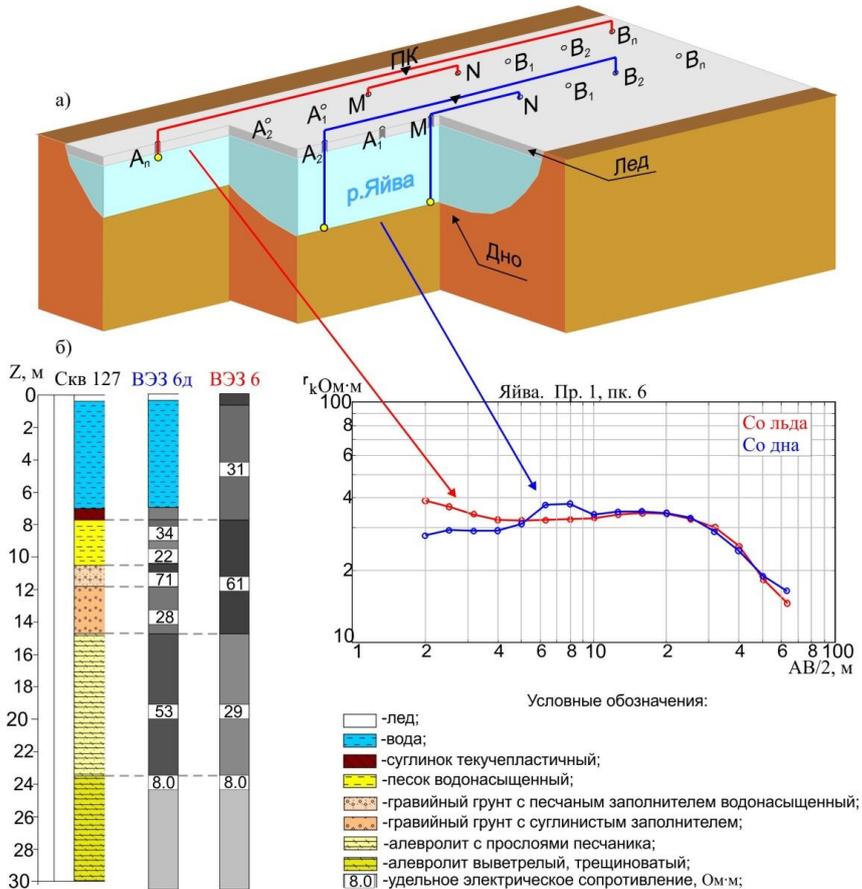


Рис. 1.10 Акваториальные электроразведочные исследования: а) – схема выполнения зондирований на примере установки AMNB, б) – результаты 1D интерпретации зондирований, выполненных вблизи скважины № 127

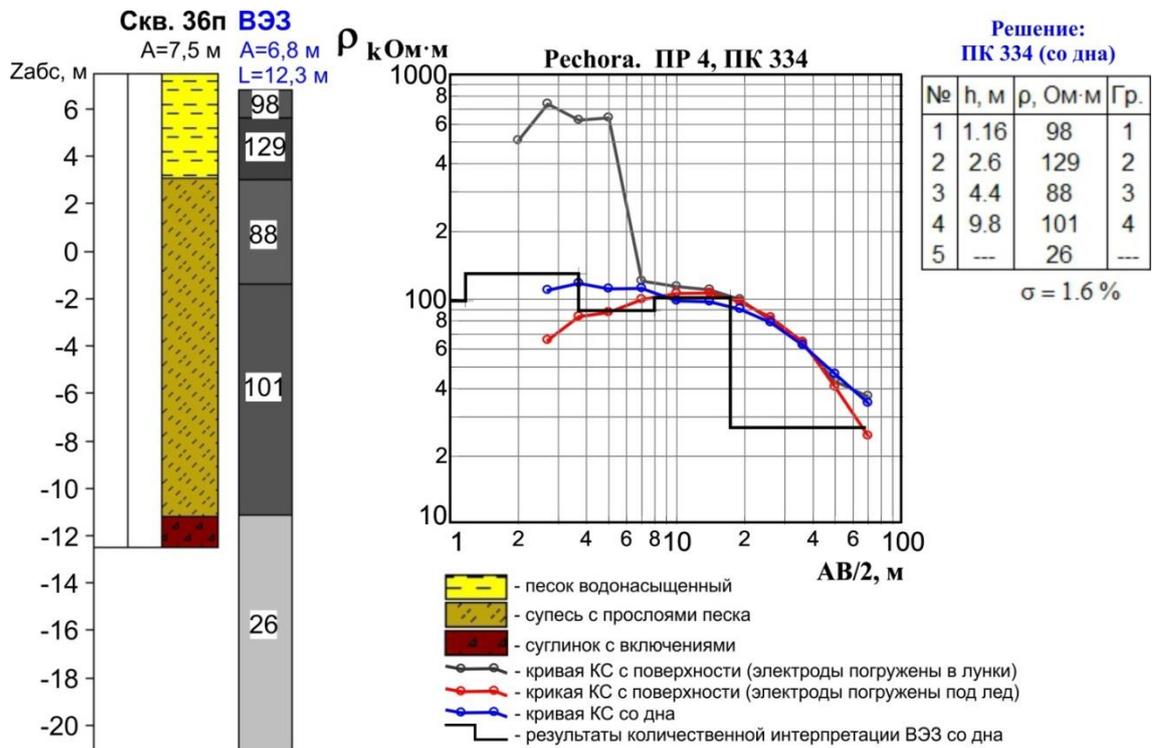


Рис. 1.11 Сравнение кривых КС на участке водного перехода через р. Печору (ПК ВЭЗ 334) и результаты количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки

Проведение поверхностных наблюдений позволяет контролировать ход правой ветви кривой зондирования и выполнить более точный анализ качества полевого материала.

Выполнение батиметрии, измерений температуры и сопротивления водного слоя необходимо для введения дальнейших поправок и повышения однозначности решения обратной задачи, определения минерализации воды для дальнейшей оценки петрофизических характеристик.

Проведение измерений температуры водного слоя может проводиться с погружением датчика термометра необходимой точности на требуемую глубину. Проведение резистивиметрии может быть выполнено с отбором проб воды и последующим измерением в специализированных приборах, например [85], или с применением трех-/четырёхэлектродной установки меньших размеров по методике, описанной в главе 2. При необходимости, измерения могут быть выполнены как дискретно, так и в непрерывном режиме.

### 1.3.2 Обработка данных и оценка качества полевого материала

Первичная оценка качества полевого материала выполняется в полевых условиях. На камеральном этапе анализа качества полевых данных необходимо выполнение обработки, введение соответствующих поправок (пункт 5 описываемой методики исследований).

Согласно проведенным исследованиям, ключевым моментом на этапе обработки является введение поправок за влияние водной толщи. Данная поправка необходима для дальнейшей корректной интерпретации как в ручном варианте с использованием программ 1D интерпретации, так и в автоматическом варианте с применением алгоритма 3D инверсии.

Результаты опытных работ показывают, что при автоматической инверсии данных ВЭЗ с помощью алгоритмов 3D [43, 67] без предварительного введения поправки за влияние водного слоя, полученное в ходе инверсии поле удельных электрических сопротивлений не согласуется с представлениями о геологическом строении участка исследований и материалами поверхностных наблюдений. Расхождение происходит несмотря на то, что значения КС имеют привязку ко дну водоема (находятся во внутренних точках среды) и проявляется в занижении значений удельных электрических сопротивлений ( $УЭС$ , 2-5 Ом·м) отложений, распространенных на глубине 2-3 м от дна реки. Это связано с неучтенным влиянием водной толщи при расчете КС донных наблюдений. Кроме того, на участках вблизи подобных заниженных значений отмечаются зоны необоснованно высоких значений сопротивления, которые, вероятно, связаны с проявлением компенсационных эффектов [6].

Одним из способов решения выявленной проблемы является устранение влияния толщи воды путем коррекции кажущегося сопротивления с учетом нахождения точки записи внутри среды – на дне. Кривые КС донных наблюдений могут быть вручную откорректированы за влияние вышележащего слоя воды. Величина коэффициента установки в этом случае зависит от мощности водной толщи и вычисляется по формуле

$$K_B = K \cdot \frac{[(r/h)^2+4]}{[(r/h)^2+2]}, \quad (1.1)$$

где  $K_B$  – геометрический коэффициент донной установки,  $K$  – геометрический коэффициент поверхностной установки,  $r$  – полуразнос установки,  $h$  – глубина погружения. При глубине воды в 7 раз меньшей размеров установки, коэффициент донной установки равен коэффициенту такой же установки, расположенной на поверхности воды (А.А. Огильви, 1990) [57].

Дальнейшая обработка проводится по стандартным принятым методикам на основании интегрального и статистического принципов [47, 55, 64]. При обнаружении явного искажения кривых вследствие влияния помех, выполняется корректировка наблюдаемых данных процедурами сглаживания и нормализации. В качестве дополнительной информации для обнаружения и оценки Р- и С-эффектов могут быть использованы результаты топографической съемки перехода или георадиолокации с нанесенными протрассированными продуктопроводами и другими техногенными объектами при наличии таковых.

Анализ кривых КС со дна и с поверхности реки показывает, что они имеют схожий характер. При проведении измерений в зимний период времени обнаруживается влияние льда на результаты поверхностных наблюдений, которое выражается в завышении левой ветви кривой. Ключевым моментом является более дифференцированный характер кривых со дна, на которых отчетливо выделяются особенности разреза, связанные с изменчивостью литологического состава прирусловых отложений (рис. 1.10, б).

### 1.3.3 Методика интерпретации

Истолкование полевого материала, полученного в русловой части водотока, рекомендуется проводить, предварительно выполнив интерпретацию данных электроразведочных наблюдений по берегам водного перехода. Результаты интерпретации по берегам реки должны быть использованы в качестве априорной информации для построения геоэлектрической модели среды русловой части водного перехода.

Перед выполнением компьютерной интерпретации данных русловых наблюдений рекомендуется предварительное определение УЭС первого слоя русловых отложений по асимптоте левой ветви донной кривой КС. Согласно [56] левая асимптота кривых ВЭЗ для донных установок равна

$$\rho_k = \frac{2\rho_{\text{воды}} \times \rho_{\text{дна}}}{\rho_{\text{воды}} + \rho_{\text{дна}}}, \quad (1.2)$$

где  $\rho_k$  – значение асимптоты левой ветви донной кривой без введения поправок по формуле (1.1),  $\rho_{\text{воды}}$  – УЭС водной толщи,  $\rho_{\text{дна}}$  – УЭС первого слоя русловых отложений, выделяющегося на донной кривой.

Значение  $\rho_{\text{воды}}$  может быть получено по результатам резистивиметрии или результатам интерпретации поверхностной кривой, при условии отсутствия искажений ее левой ветви.

Отсюда, удельное электрическое сопротивление первого слоя русловых отложений может быть определено по формуле

$$\rho_{\text{дна}} = \frac{\rho_k \times \rho_{\text{воды}}}{2\rho_{\text{воды}} - \rho_k}. \quad (1.3)$$

Вычисленное значение УЭС первого геоэлектрического горизонта может быть использовано в качестве дополнительной априорной информации как опорное при проведении дальнейшей интерпретации и контроля ее результатов.

Следующим этапом является проведение автоматической компьютерной интерпретации данных ВЭЗ в программах 3D инверсии [43, 67].

Важно отметить, что в данной работе речь идет именно об автоматической интерпретации данных ВЭЗ с помощью алгоритмов 3D инверсии, а не о 3D инверсии как таковой. Автор осознает, что описываемые профильные наблюдения ВЭЗ, с шагом между пикетами в 3-5 раз меньшим относительно максимального разноса установки, соответствуют понятию 2D систем наблюдений. Однако, в представленной методике исследований на различных этапах интерпретации данных ВЭЗ, вследствие ориентации

установок зондирования поперек профиля и обозначенной проблематики, рассматривается применение 1D и 3D алгоритмов.

Программа 3D инверсии используется на этапе предварительной интерпретации данных ВЭЗ с целью увеличения оперативности исследований. При проведении автоматической инверсии ВЭЗ, современное 3D программное обеспечение на каждом пикете позволяет учитывать ориентацию установки наблюдения вдоль линии уреза воды (поперек линии профиля) и возможные изменения рельефа дна по результатам батиметрии, после привязки каждого электрода в плане и по глубине.

Получаемая без данных бурения в процессе автоматической интерпретации скорректированных за влияние водной толщи кривых КС геоэлектрическая модель среды, позволяет проанализировать распределение удельных электрических сопротивлений отложений, отражающих особенности геологического строения участка исследований. Характер удельных электрических сопротивлений позволяет предполагать изменение свойств и литологии придонных отложений и коренных пород в русловой части, что, по результатам настоящих исследований [6, 7], является достаточным для постановки буровых работ.

За счет автоматизации процесса интерпретации увеличивается производительность инженерно-геологических изысканий, поскольку геоэлектрическая модель с приоритетными участками постановки бурения может быть получена в отсутствии информации о строении разреза в русловой части перехода уже на этапе полевых геофизических исследований.

После выполнения буровых работ с учетом скважинных данных необходимо построение окончательной геоэлектрической модели среды.

Опыт выполненных исследований показывают, что в ходе сравнительного анализа результатов автоматической инверсии данных ВЭЗ и их одномерной интерпретации обнаруживается более интегральный, сглаженный характер поля удельных электрических сопротивлений по данным автоматической инверсии. Одномерная интерпретация позволяет

контролировать процесс истолкования и принимать наиболее обоснованные решения при доопределении обратной задачи, что оказывается особенно важным при исследовании в сложных условиях акваторий. В связи с этим, построение окончательной геоэлектрической модели среды необходимо выполнять в программе 1D интерпретации с учетом результатов бурения, автоматической инверсии и интерпретации данных береговых исследований. Окончательная геоэлектрическая модель состоит из участка русловой части водотока, полученного на основе интерпретации материалов донных наблюдений, и участков береговых поверхностных наблюдений. Интерпретация выполняется в соответствии с принятым методологическим подходом и его основными принципами [47, 55, 64, 84].

Более подробно примеры сравнительного анализа и результатов электроразведочных исследований на участках водных переходов в сложных инженерно-геологических условиях представлены в следующей главе 1.4.

#### **1.4 Апробация и опыт применение защищаемой методики**

В качестве примеров электроразведочных исследований, выполненных по защищаемой методике, ниже представлены результаты инженерно-геологических изысканий на участках переходов инженерных сооружений через реки Яйву и Печору.

##### **1.4.1 Исследование водного перехода через реку Яйву**

Исследования проводились в декабре 2012 г. на р. Яйве в Березниковском районе Пермского края, ширина реки составляет 160 м (рис. 1.12). Исследования выполнены методом ВЭЗ по защищаемой методике с использованием четырехэлектродной установки Шлюмберже. Температура воздуха на дату проведения исследований составляла минус 40-42°С. Установка располагалась параллельно линии уреза воды (поперек профиля). Измерения проводились на двух уровнях: со льда и дна реки (рис. 1.9, 1.10), глубина исследований от дна реки составляла 20-25 м. Величина разноса изменялась от 4 до 140 м, расстояние между пикетами ВЭЗ – 30м. Глубина дна

изменялась до 8 м. Для минимизации искажений вследствие течения реки в качестве заземлителей были использованы утяжеленные электроды.

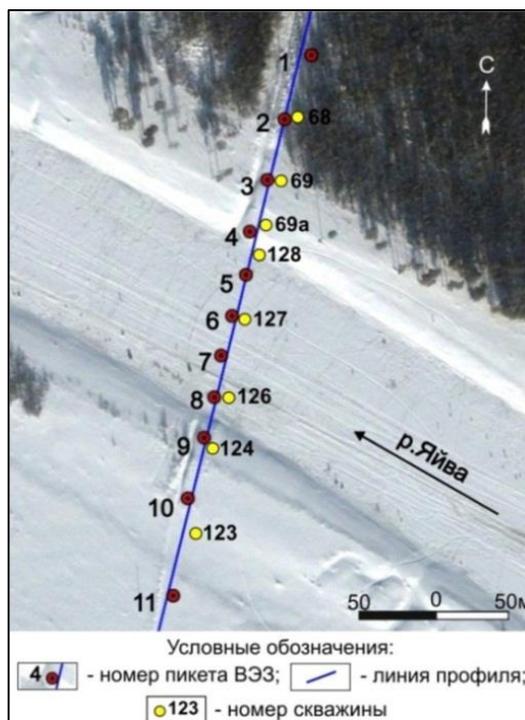


Рис. 1.12 Обзорная схема участка исследований водного перехода через р. Яйву

Для выполнения экспресс количественной интерпретации данных ВЭЗ, на предприятии ООО НИПППД «Недра» при участии автора был создан конвертор, позволяющий оперативно переводить данные из формата «Зонд» (В.П. Колесников, В.А. Кутин, С.В. Мокроносов), измеренные аппаратурой АМС-1, в формат программы ZondRez3D (А.Е. Каминский).

На этапе экспресс автоматической инверсии скорректированных за влияние водного слоя кривых КС в программе ZondRez3D без данных бурения получена модель распределения удельных электрических сопротивлений среды, отражающая особенности геологического строения участка исследований (рис. 1.13, а). В районе пикетов 4, 6, 8 отмечен ряд локальных аномалий, на приоритетных участках выполнена постановка буровых работ.

Проходка скважин №№ 126, 127, 128 подтвердила прогнозируемые особенности геологического разреза. Вблизи пикета 4 увеличение сопротивления в интервале до 10-14 м связано с присутствием песков и гравийного грунта в толще придонных отложений. В районе пикета 6

выявлено увеличение выветрелости коренных пород с глубины 23 м. На пикете 8 обнаружено увеличение содержания глинистого материала в рыхлых грунтах, а с глубины 24-25 м – изменение литологического состава коренных пород.

Построение окончательной геоэлектрической модели среды выполнено с учетом данных бурения и всей имеющейся априорной информации в программе одномерной интерпретации «Зонд» [46].

Геоэлектрическая модель среды, полученная на этапе одномерной интерпретации с учетом информации по бурению, согласуется с данными автоматической инверсии. Однако в интервале глубин 20-35 м на пикете 4 выделяется аномалия повышенных сопротивлений, слабо проявляющаяся в результатах автоматической инверсии (рис. 1.13, б). При постановке контрольного бурения (скв. № 69а) в данном интервале были вскрыты песчаники [6].

После построения окончательной геологической модели участка исследований был выполнен сравнительный анализ результатов автоматической инверсии и одномерной интерпретации. По данным одномерной интерпретации, донные отложения, представленные серыми текучепластичными суглинками (инженерно-геологический элемент ИГЭ–2р) мощностью 1–3 м, имеют сопротивления 19–34 Ом·м. Толща суглинков подстилается песчано-гравийными отложениями (ИГЭ–5, 5р, 6, 6р), распространенными в интервале глубин 3–15 м. В связи с увеличением содержания глинистого материала и обводненности песчано-гравийных отложений, их сопротивление уменьшается от 150 Ом·м на берегах до 40 Ом·м в русловой части. Вблизи пикетов 5–8 в интервале глубин 12–16 м разрез сложен отложениями гравийного грунта с суглинистым заполнителем. Отложения характеризуются сопротивлением 27–28 Ом·м. Увеличение содержания глинистого материала отмечается уменьшением УЭС до 17 Ом·м в районе пикета 8 (скважина № 126).

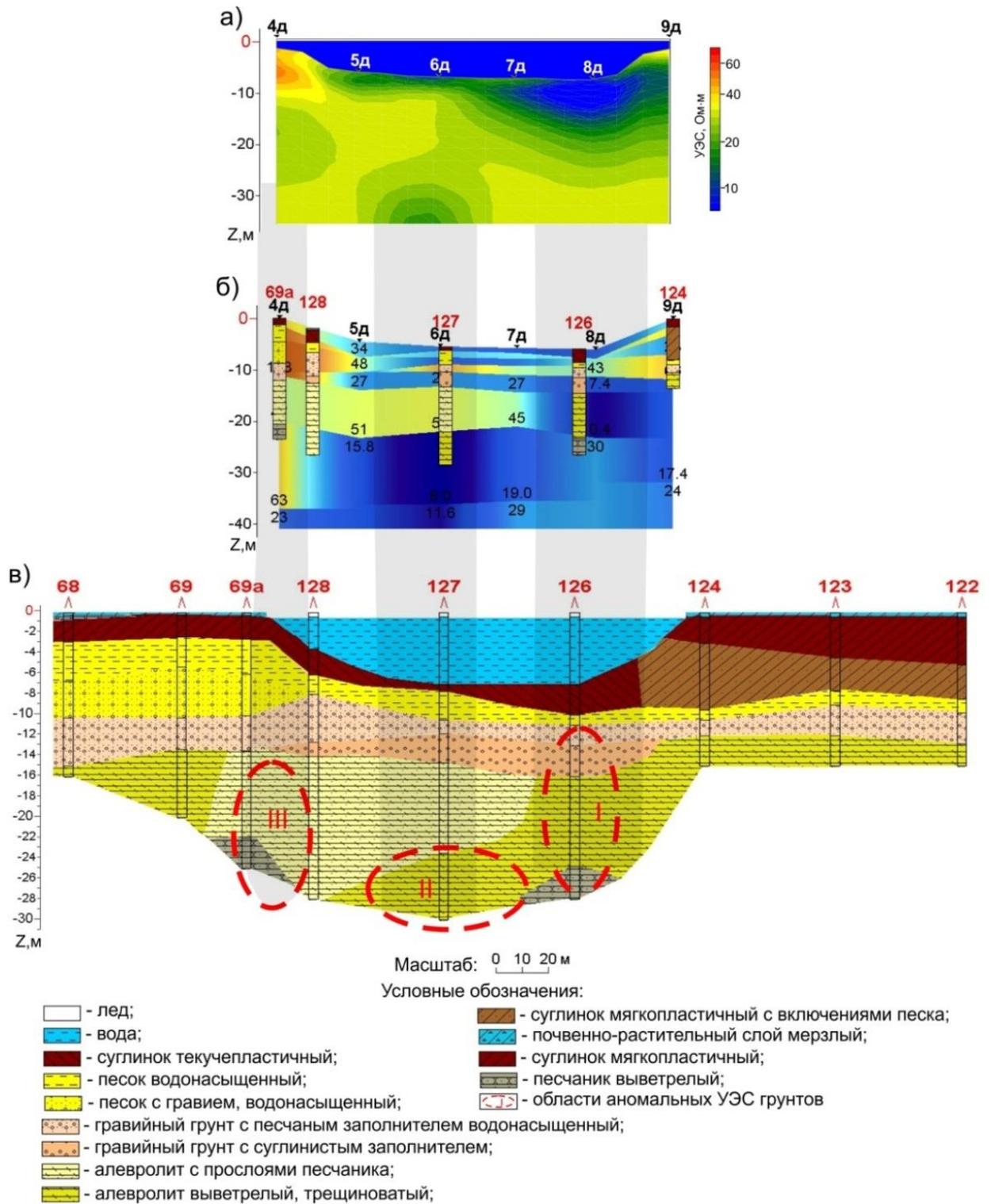


Рис. 1.13 Результаты геолого-геофизических исследований водного перехода через р. Яйву: а) – геоэлектрический разрез по результатам автоматической инверсии донных кривых ВЭС, б) – геоэлектрический разрез, по результатам 1D интерпретации донных кривых, в) – геологический разрез

По данным автоматической инверсии, рассматриваемые инженерно-геологические элементы объединяются в общую толщу с интегральным сопротивлением 15–30 Ом·м. В районе пикета 8 также наблюдается уменьшение сопротивления до 8–15 Ом·м, что соответствует результатам одномерной интерпретации и данным бурения (рис. 1.13, область I).

Коренные породы выделяются, как по одномерной интерпретации, так и по автоматической инверсии. Они представлены выветрелыми алевролитами с прослоями песчаника, кровля которых находится на глубине 14–16 м. Согласно одномерной интерпретации, отложения, содержащие пропластки песчаника (ИГЭ–7р), имеют сопротивление 45–53 Ом·м. Алевролит с меньшим содержанием песчаного материала (ИГЭ–7) характеризуется сопротивлением 20–14 Ом·м, в районе пикетов 6 (интервал глубин 24–38 м) и 8 (интервал глубин 15–25 м) он обладает минимальными значениями удельного электрического сопротивления, которое составляет 8–10 Ом·м.

По результатам автоматической инверсии, отложения алевролита характеризуются сопротивлениями 30–35 Ом·м (ИГЭ–7р) и 19–25 Ом·м (ИГЭ–7). Аномалии пониженного сопротивления в этой толще выделяются вблизи пикетов 6, 8, где значения УЭС составляют 15–25 Ом·м (рис. 1.13, область I, II).

В ходе одномерной интерпретации в толще коренных пород отмечены следующие особенности. На пикетах 4, 8 с глубины 22–25 м наблюдается относительное повышение сопротивления (с 15 Ом·м до 30–60 Ом·м), подтвержденное при вскрытии наличием линз песчаника (ИГЭ–8) в алевролитовой толще (рис. 1.13, область I, III). Вдоль опорного горизонта на глубине 30–35 м (рис. 1.14) отмечаются области незначительного повышения сопротивлений (до 30–40 Ом·м), вероятно, связанные с выветрелыми песчаниками. На донных кривых толща песчаников выражается более контрастно и проявляется в виде увеличения угла подъема правой ветви кривой зондирования.

В материалах автоматической инверсии особенность, связанная с присутствием песчаника, проявляется менее контрастно и только на пикете 8 с глубины 28 м происходит увеличение сопротивлений до 30–35 Ом·м.

Более подробно результаты сравнительного анализа автоматической инверсии, 1D интерпретации со дна и с поверхности реки (рис. 1.14) и данных бурения представлены в таблицах 1.8 – 1.11. На основании данных бурения выполнена оценка погрешности определения глубин кровли ИГЭ, полученных по результатам электроразведочных работ.

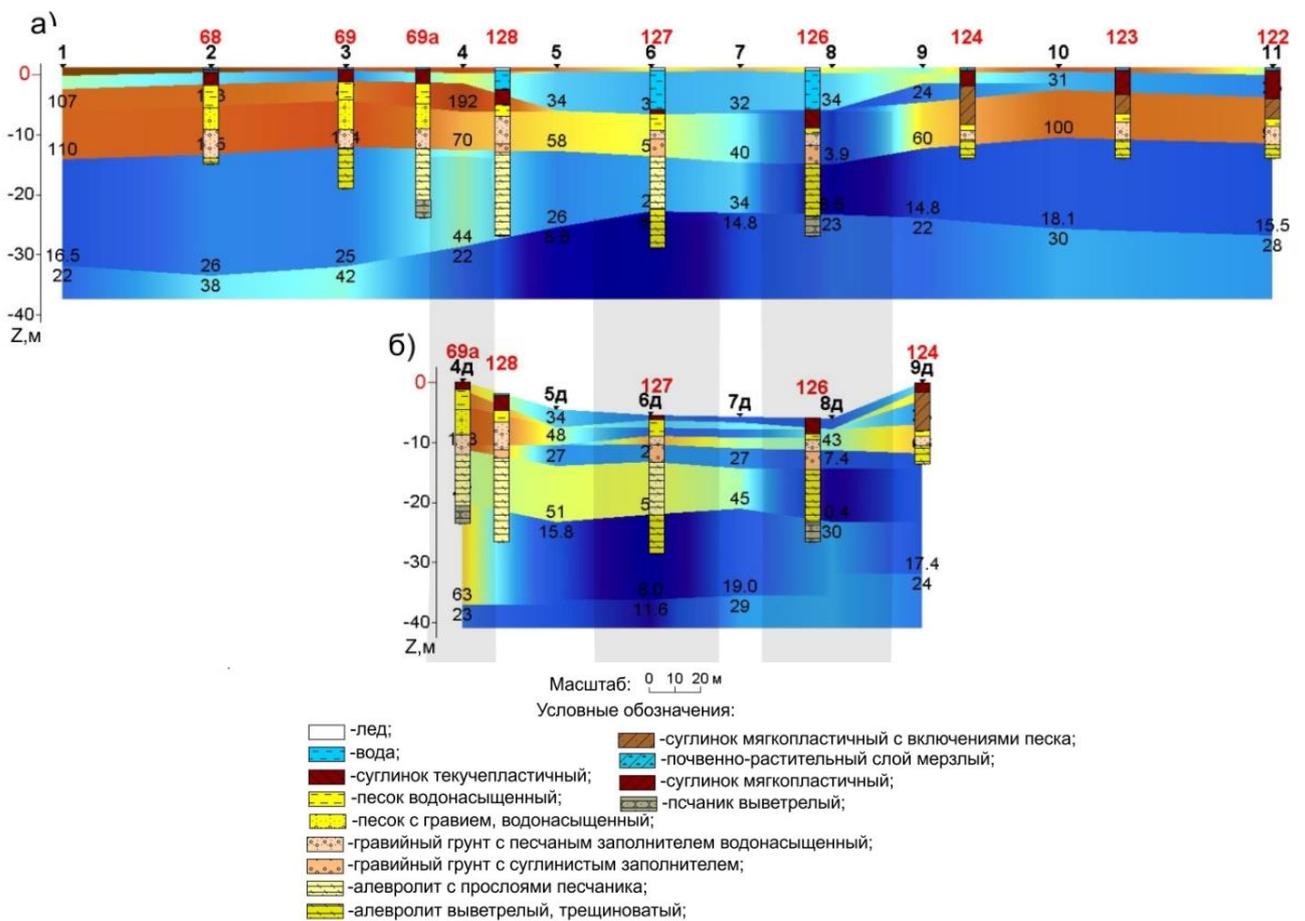


Рис. 1.14 Сравнение результатов геофизических исследований со дна и с поверхности р. Яйвы: а) – геоэлектрический разрез с поверхности реки, б) – геоэлектрический разрез со дна реки

Таблица 1.8

Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 69а)

№ ИГЭ	Скв. №69а	Мощность ИГЭ, м	Вертикальное электрическое зондирование 1D					
			Со льда			Со дна		
	Глубина кровли, м		Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %
2р	0,3	2,3	0,8	1,9	166	0,3	2,3	0
5	2,6	3,4	2,7	4,0	3,8	2,6	3,8	1,0
5р	6,0	4,1	6,7	5,7	12	6,4	4,4	1,7
6р	10,1	3,4	–		–	10,8	4,7	6,9
7р	13,5	8,5	12,4	21,6	8,1	15,5	5,0	14,8
8	21,5	–	Не выделяется			20,5	16,0	4,7

Глубины кровли ИГЭ по данным ВЭЗ со дна приведены к поверхности льда

Таблица 1.9

Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 126)

№ ИГЭ	Скв. №126	Мощность ИГЭ, м	Вертикальное электрическое зондирование 1D					
			Со льда			Со дна		
	Глубина кровли, м		Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %
2р	7,0	3,0	7,0	3,1	0	7,0	2,9	0
5	10	1,0	10,1	6,3	1,0	9,9	3	1,0
6р	11	2,0	–		–	–		–
6	13	3,0	–		–	12,9	3,3	0,8
7р	16	8,8	16,4	16,1	2,5	16,2	8,3	1,3
8	24	–	25,0	>12	4,2	25,0	>15	4,2

Глубины кровли (подшвы) ИГЭ по данным ВЭЗ со дна приведены к поверхности льда

Таблица 1.10

Сравнение глубин кровли ИГЭ, выделенных по результатам бурения и 1D интерпретации (для скважины № 127)

Скв. №127			1D интерпретация							
			Со льда				Со дна реки			
№ ИГЭ	Глубина кровли, м	Мощность, м	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	УЭС, Ом·м	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	УЭС, Ом·м
2р	7	0,7	7,1	7,8	1,4	55	7	0,8	-	24
5	7,7	2,8	-		-		7,8	1,3	1	34
			-		-		9,1	1,4		
			-		-		10,5	1,4		
6	11,8	2,9	-		-		-	11,9	2,9	0,8
7р	14,7	8,8	14,9	8,9	1,4	19	14,8	8,7	0,7	53
7	23,5	-	23,8	-	1,3	8	23,5	14,3	0	8

Глубины кровли ИГЭ по данным ВЭЗ со дна реки приведены к поверхности льда

Таблица 1.11

Сравнение результатов автоматической инверсии и 1D интерпретации донных ВЭЗ с данными бурения (для скважины № 127)

Скв. №127			Результаты интерпретации ВЭЗ со дна реки								
			автоматическая инверсия				1D интерпретация				
№ ИГЭ	Глубина кровли, м	Мощность, м	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	УЭС, Ом·м	Глубина кровли, м	Мощность, м	Погрешность определения глубины, %	УЭС, Ом·м	
2р	7	0,7	7	1	-	12÷15	7	0,8	-	24	
5	7,7	2,8	8	3	4	16÷30	7,8	1,3	1	22	
							9,1	1,4			34
							10,5	1,4			71
6	11,8	2,9	-	9	-	34	11,9	2,9	0,8	28	
7р	14,7	8,8	-				-	14,8	8,7	0,7	53
7	23,5	-	20	-	15	30÷18	23,5	-	0	8	

Глубины кровли ИГЭ по данным ВЭЗ со дна реки приведены к поверхности льда

### 1.4.2 Исследование водного перехода через реку Печору

В задачи геофизических исследований входило выполнение электрического зондирования с целью изучения строения геологического разреза и его свойств до глубины 35 метров, а также измерений необходимых для защиты сооружений от коррозии. На переходе через водную преграду в общей сложности выполнено 50 точек вертикального электрического зондирования. Измерения по берегам р. Печоры выполнены в августе 2015 г., наблюдения в русловой части проведены в январе-феврале 2016 гг.

Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) в русловой части выполнялись с использованием трёхэлектродной установки со дна реки, заземление электродов происходило в донные отложения. Установка располагалась параллельно линии уреза воды (поперек профиля). Значения полуразносов питающей линии АО изменялись до 70 м с шагом, соответствующим семи точкам на модуль билогарифмического бланка. Использована приемная линия MN размером 2 м.

По берегам реки наблюдения выполнены четырехэлектродной симметричной измерительной установкой Шлюмберже. По мере увеличения глубины исследования максимальные разносы питающей линии изменялись от 28 до 140 м. Использована приемная линия MN размером 1 м

Расстояние между точками зондирования по берегам реки изменялось от 50 до 100 м, в русловой части шаг наблюдений составлял 40–50 м. В русле отработаны 22 физические точки.

Построение окончательной геоэлектрической модели среды выполнено на основе результатов анализа донных параметрических зондирований (рис. 1.15, 1.16), геоэлектрический разрез на участке водного перехода через реку Печору представлен на рисунке 1.17. Коротко основные особенности инженерно-геологических условий сводятся к следующему:

– донные отложения до глубины 1–3 м представлены преимущественно песчано-гравийным материалом;

- в направлении от правого к левому берегу в интервале глубин от 1–3 до 15–25 м прирусловые отложения залегают наклонно и представлены переслаиванием суглинка с супеси (ПК ВЭЗ 216–337);
- в интервале ПК ВЭЗ 337–347 разрез сложен водонасыщенным песком;
- в строении склона левого берега преобладают грунты с бо́льшим содержанием глинистого материала;
- опорный горизонт связан с глинистыми отложениями и выделяется на глубине 15–28 м;
- участки наиболее резкой латеральной изменчивости удельных электрических сопротивлений связаны с залеганием в русловой части гравийного грунта и песка средней степени водонасыщения на левом берегу реки (ПК ВЭЗ 220, 221).

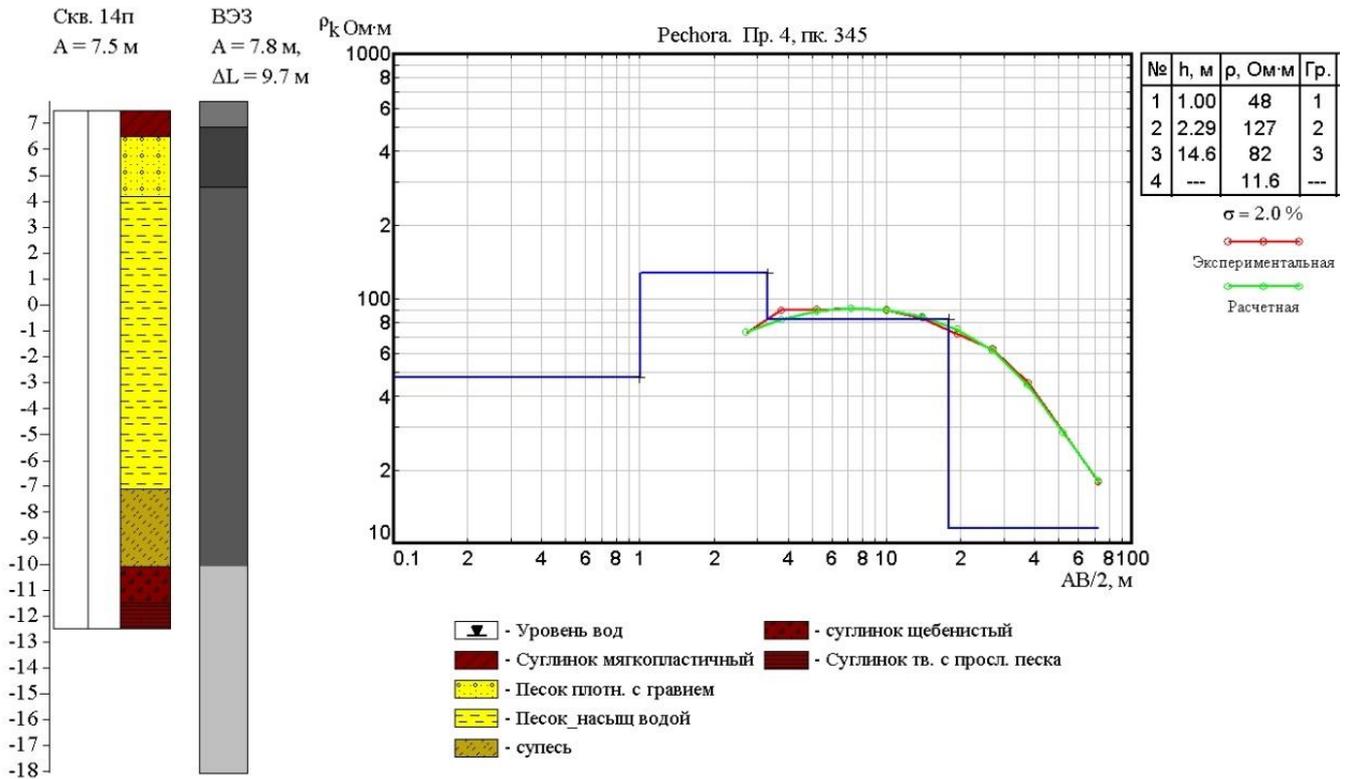


Рис. 1.15 Пример количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки (переход через р. Печору, ПК ВЭЗ 345)

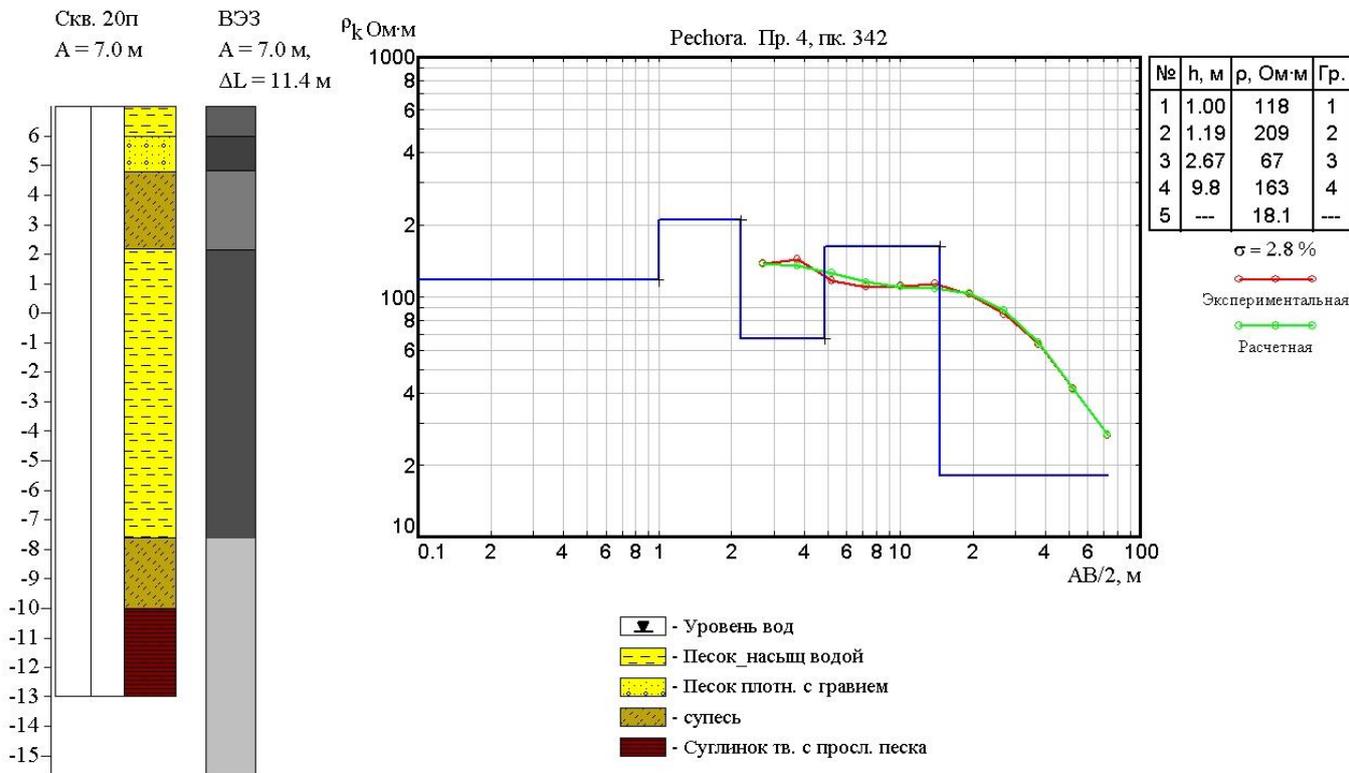


Рис. 1.16 Пример количественной интерпретации параметрического зондирования со дна реки (переход через р. Печору, ПК ВЭЗ 342)

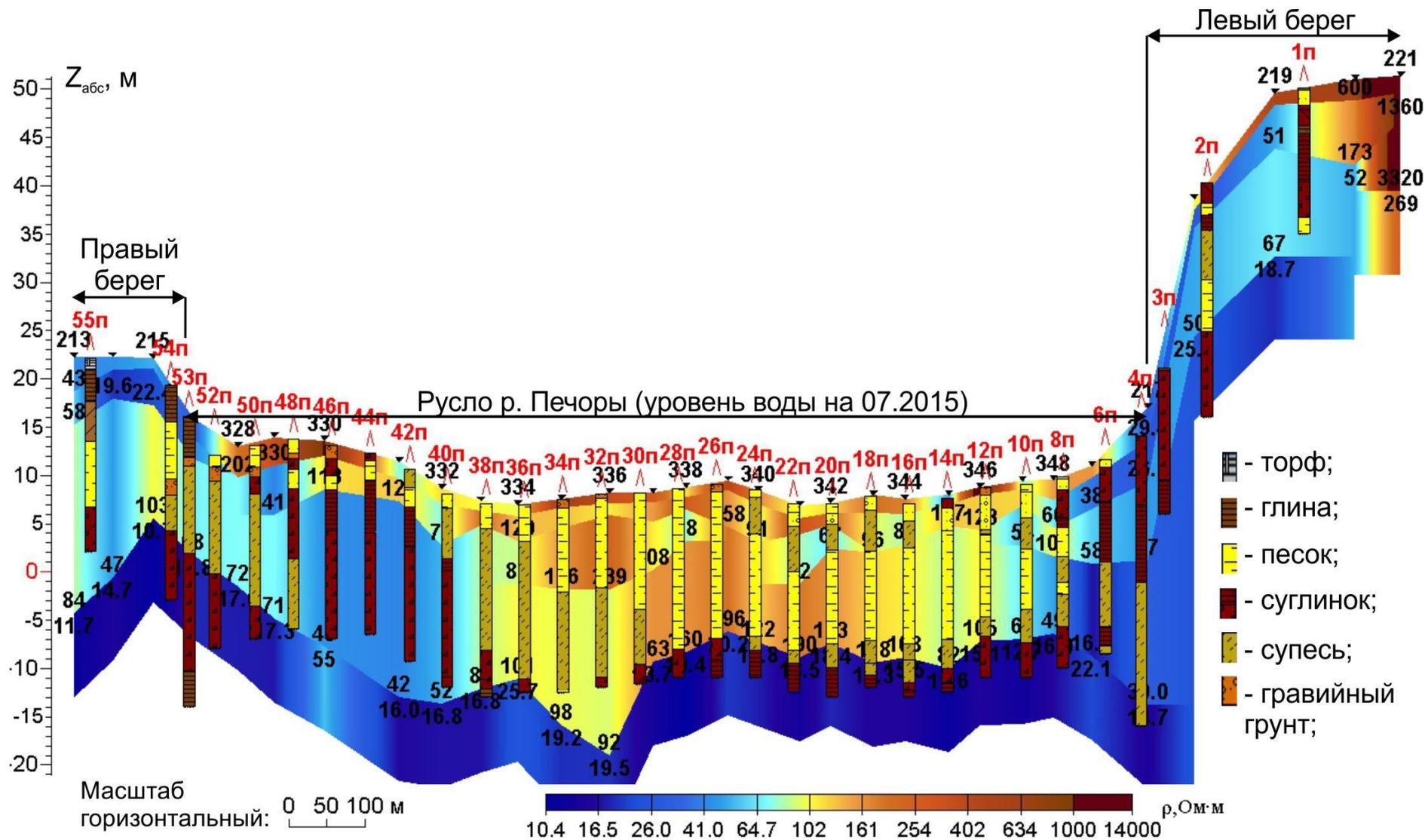


Рис. 1.17 Геоэлектрический разрез по трассе водного перехода через р. Печору

## 1.5 Выводы к главе 1

Результаты выполненных исследований и опыт производственных работ позволили обосновать следующие выводы:

1. Применение донных наблюдений, в сравнении с поверхностными, 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. При проведении исследований в зимний период времени, донные кривые КС, в сравнении с поверхностными, меньше подвержены влиянию льда и водной толщи, если она составляет более 1-1,5 м.

3. При автоматической инверсии данных ВЭЗ на акваториях существует проблема учета влияния водной толщи на результаты донных измерений. Один из способов исключения подобного влияния заключается в ручной коррекции входных данных кажущегося сопротивления согласно условиям нахождения установки наблюдения во внутренних точках среды.

4. Сравнительный анализ результатов истолкования с применением различных алгоритмов показывает, что модель среды, восстановленная при автоматической инверсии данных ВЭЗ, характеризуется большей интегральностью по сравнению с одномерной интерпретацией.

5. Использование автоматической инверсии при предварительной интерпретации акваториальных данных ВЭЗ имеет преимущество, заключающееся в повышении оперативности процесса построения электрической модели среды без априорной информации. Это является достаточным для прогноза изменений в геологическом разрезе и способствует оперативной постановке буровых работ, снижению затрат на «слепое» бурение при инженерно-геологических изысканиях.

6. Сходимость по глубине с базовым геологическим методом изменяется от единиц до первых десятков процентов. Измерения со дна реки обладают меньшей погрешностью определения глубин ИГЭ в сравнении с поверхностными наблюдениями. Однако необходимо дополнять донные наблюдения измерениями с поверхности реки, что позволяет осуществлять контроль получаемой информации и является одним из способов повышения детальности исследований.

7. Области изменения удельного электрического сопротивления грунтов, выделенные в ходе геофизических исследований, по результатам бурения подтверждаются изменением литологического состава и свойств отложений. При проектировании геологических исследований необходимо учитывать дополнительный объем бурения для заверки аномальных значений геофизических параметров.

8. 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 исследований.

Полученные выводы легли в основу первого защищаемого положения: *«Методика исследования водных переходов, основанная на результатах электрических зондирований со дна акваторий, позволяющая повысить разрешающую способность и глубинность исследований»*. Предложенная методика была апробирована на ряде объектов исследования в ходе инженерно-геологических изысканий следующих водотоков: р. Яйвы, р. Колвы, р. Ухты, р. Печоры, р. Харьяги; и внедрена в производство на предприятии ООО НИПППД «Недра». Материалы исследований изложены в следующих публикациях [6, 7, 8, 10, 11]. Первое защищаемое положение считаю доказанным.

## ГЛАВА 2

### Методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов

В главе 2 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»* [1, 8, 10, 14].

#### 2.1 Анализ существующих методик лабораторного измерения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов

Удельное электрическое сопротивление – физическая величина, характеризующая противодействие единицы объема вещества (горных пород, вод и т. п.) прохождению электрического тока (В.Н. Дахнов, 1951) [36]. УЭС зависит от вещественного состава, пористости, влагонасыщенности, температуры и минерализации поровой влаги. Измерение УЭС образцов грунтов необходимо для определения этих петрофизических характеристик и использования их в качестве априорной информации при проектировании электроразведочных работ, а также интерпретации результатов исследований в ходе решения многих геологических задач.

Способы измерения сопротивления образцов подразделяются на две основные группы: непосредственной оценки (по приборам) и сравнения в равновесном режиме (по мостовым и компенсационным схемам). Каждая из групп имеет модификации прямых и косвенных способов. В прямых модификациях электрическое сопротивление измеряется прибором (омметром, мегометром, омметром с логарифмическим измерителем). В косвенных модификациях приборами измеряются разность потенциалов  $\Delta U$  на образце,  $\Delta U_{\text{эт}}$  на эталонном сопротивлении  $R_{\text{эт}}$  в измерительной цепи или

$\Delta U$  на образце и силы тока  $I$  в измерительной цепи с последующим расчетом сопротивления по формулам:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{эт}}} \cdot R_{\text{эт}}; \quad (2.1)$$

$$R = \frac{\Delta U}{I}. \quad (2.2)$$

Удельное электрическое сопротивление образца (Ом·м) определяется по формуле

$$\rho = R \frac{S}{L}, \quad (2.3)$$

где  $R$  – измеренное или вычисленное сопротивление, Ом,  $S$  – площадь сечения образца, м<sup>2</sup>,  $L$  – его длина, м.

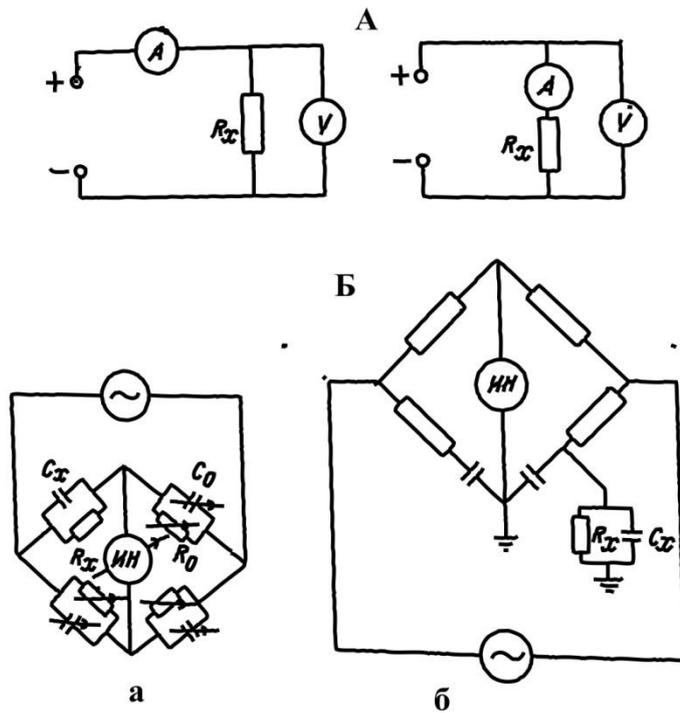
Измерения могут быть выполнены как на постоянном, так и на переменном токе.

Таким образом, существующие методики измерения основаны на использовании различных двух-четырёхэлектродных установок и измерительных ячеек или кернодержателей [46]. Ниже представлен краткий анализ типовых методик измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов.

#### *Двухэлектродные способы измерения*

В двухэлектродных способах электроды располагают симметрично друг относительно друга с противоположных сторон образца. Удельное электрическое сопротивление вычисляют по формуле 2.3.

При измерениях УЭС низкоомных грунтов применяется метод амперметра-вольтметра или мостиковые схемы на постоянном токе (рис. 2.1). Для высокоомных грунтов используется высокочувствительный гальванометр, при измерении сопротивлений пород более  $10^{16}$  Ом применяется электрометр.



$C_x$  – искомая емкость,  $C_0$  – компенсирующая емкость,  
 $R_x$  – искомое сопротивление,  $R_0$  – компенсирующее сопротивление,  
 ИН – индикатор

Рис. 2.1 Схемы для измерения электрических свойств образцов грунтов двухэлектродным способом: А) – удельного электрического сопротивления методом амперметра-вольтметра; Б) – удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости, а) – с параллельным включением сопротивления и емкости в плечах, б) – с последовательным включением сопротивления и емкости в плечах

При массовых измерениях часто применяется двухэлектродный метод сопротивления заземления. Электроды погружаются в образец на глубину, равную их радиусу. Сопротивление заземлений  $R_{\text{э}}$  зависит от радиуса электродов  $r$  и удельного сопротивления образца  $\rho$ :

$$R_{\text{э}} = \frac{\rho}{4\pi r}. \quad (2.4)$$

При измерении электрического сопротивления двухэлектродным способом методом постоянного тока существенные погрешности вносят поверхностные токи, поляризация и переходное сопротивление. Переходное сопротивление уменьшается путем шлифовки поверхности образцов,

покрытие контактных поверхностей графитом, распыленным металлом, специальной пастой, серебряной коллоидальной пленкой. Для учета влияния поляризации электродов измеряют ток поляризации.

Для исключения влияния поверхностных токов применяется охранное кольцо, которое изготавливается из того же материала, что и электроды, и включается в цепь, минуя прибор, измеряющий силу тока. Применение двух охранных колец позволяет производить измерения при прямом и обратном направлениях тока через образец и тем самым уменьшить влияние токов поляризации.

С целью уменьшения влияния поляризационных эффектов, а также изменения сопротивления в приэлектродных зонах широко применяются двухэлектродные способы измерения на переменном токе. В переменных электрических полях с увеличением частоты тока уменьшается роль приэлектродных эффектов и объемной поляризации. Однако при измерении сопротивления на переменном токе следует учесть емкостные эффекты, возникающие из-за отсутствия общей заземленной точки у генераторных и измерительных устройств, и увеличивающиеся с повышением частоты переменного тока.

Измерение удельного сопротивления образцов на низких частотах производится мостовым способом (рис. 2.1, Б), на радиочастотах – мостовым (рис. 2.2), резонансным и импульсным методами, что позволяет также измерять их диэлектрическую проницаемость (Н.Б. Дотман) [38, 39]. Для грунтов с большими электрическими потерями применяется мостовая схема с параллельным включением сопротивления и емкости (рис. 2.1, а), для образцов с малыми электрическими потерями – мосты с последовательным соединением сопротивления и емкости (рис. 2.1, б). Резонансный метод определения УЭС базируется на измерении добротности контуров. Импульсный метод определения УЭС применяется для высокоомных грунтов. Схемы, основанные на импульсном принципе, свободны от поляризационных, емкостных эффектов и нагрева. Измеряя величину двух соседних амплитуд

затухающего колебания, можно определить сопротивление пород, поскольку колебания контура затухают по закону, определяемому добротностью контура, а последняя зависит от сопротивления породы.

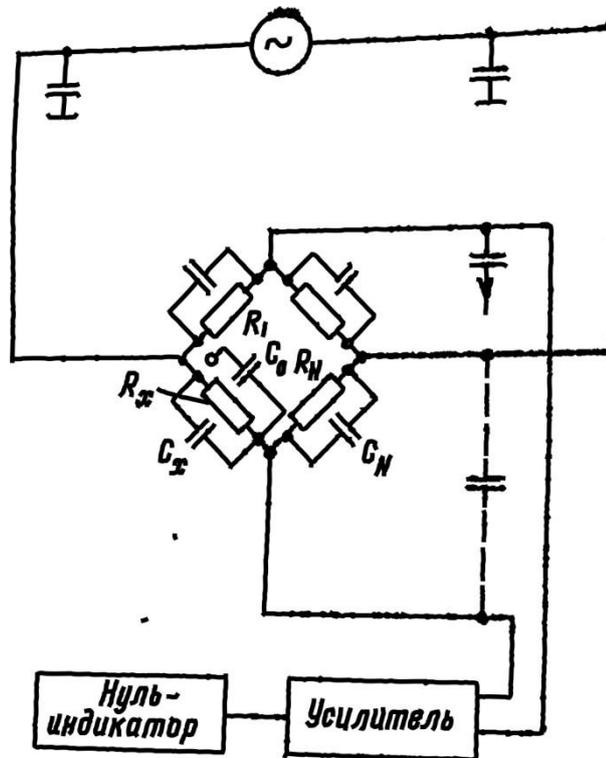


Рис. 2.2 Мостовая схема измерения сопротивления горных пород на высоких частотах

#### *Четырехэлектродные способы измерения*

В четырехэлектродных способах измеряется падение напряжения  $\Delta U$  между приемными электродами, происходящее при пропускании тока  $I$  через пару питающих электродов. Удельное электрическое сопротивление вычисляют по формуле

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.5)$$

где  $K$  – коэффициент установки.

Наиболее часто в четырехэлектродном способе применяется схема с расположением питающих электродов на торцах образца (рис. 2.3). Образец должен иметь форму цилиндра или параллелепипеда, тогда коэффициент установки зависит от его площади поперечного сечения и длины:

$$K = \frac{S}{L}, \quad (2.6)$$

где  $S$  – площадь сечения образца,  $m^2$ ,  $L$  – его длина, м.

При определении сопротивлений высокоомных пород применяется охранное кольцо с целью устранения погрешностей, обусловленных поверхностными токами.

Преимуществом четырехэлектродного метода является исключение приэлектродной поляризации.

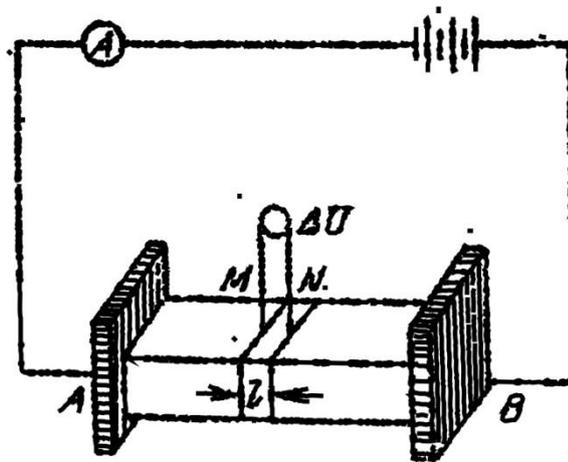


Рис. 2.3 Схема измерения удельного электрического сопротивления четырехэлектродным способом с расположением электродов на торцах образца

На сегодняшний день, при решении задач электрохимической защиты сооружений от коррозии и старения, определение УЭС грунтов в лабораторных условиях регламентирует ГОСТ 9.602-2016, согласно которому при измерениях применяется вышеописанная четырехэлектродная схема.

*Определение удельного электрического сопротивления грунта в лабораторных условиях согласно ГОСТ 9.602-2016 [34]*

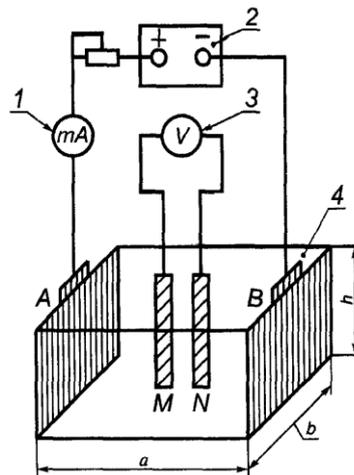
Для определения удельного электрического сопротивления грунта отбирают пробы грунтов в шурфах, скважинах и траншеях из слоев. Для пробы берут от 1,5 до 2 кг грунта, удаляют твердые включения размером более 3 мм. Отобранную пробу помещают в полиэтиленовый пакет и снабжают паспортом, в котором указывают номера объекта и пробы, место и глубину

отбора пробы. Если уровень грунтовых вод выше глубины отбора проб, отбирают грунтовый электролит объемом от 200 до 300 см<sup>3</sup> и помещают в герметически закрывающуюся емкость, маркируют и снабжают паспортом.

Для измерения используют источник постоянного или низкочастотного переменного тока любого типа. Миллиамперметр любого типа класса точности не ниже 1,5 с диапазонами 200 или 500 мА. Вольтметр любого типа с внутренним сопротивлением не менее 1 МОм. Допускается использовать специальные приборы. Определение УЭС выполняют при помощи ячейки прямоугольной формы внутренними размерами:  $a = 100$  мм;  $b = 45$  мм;  $h = 45$  мм из диэлектрического материала (стекло, фарфор, пластмасса) или стали с внутренней футеровкой изоляционным материалом. Измерения проводят с помощью электродов. Внешние (А, В) имеют размер 44×40 мм (40 мм – высота электрода) в виде прямоугольных пластин (из углеродистой или нержавеющей стали) с ножкой, к которой крепят или припаивают проводник-токоподвод. Одну сторону каждой пластины, которая примыкает к торцовой поверхности ячейки, изолируют. Электроды внутренние (М, N) из медной проволоки или стержня диаметром от 1 до 3 мм и длиной на 10 мм больше высоты ячейки.

Отобранную пробу песчаных грунтов смачивают до полного влагонасыщения, а глинистых – до достижения мягкопластичного состояния. Если уровень грунтовых вод ниже уровня отбора проб, смачивание проводят дистиллированной водой, а если выше – грунтовой водой.

Электроды зачищают шлифовальной шкуркой, обезжиривают ацетоном и промывают дистиллированной водой. Внешние электроды устанавливают вплотную к внутренним торцовым поверхностям ячейки. При сборе ячейки пластины размещают друг к другу неизолированными сторонами. Затем в ячейку помещают грунт, послойно утрамбовывая его. Высота грунта должна быть на 4 мм менее высоты ячейки. Устанавливают внутренние электроды вертикально, опуская их до дна по центральной линии ячейки на расстоянии 50 мм друг от друга и 25 мм – от торцовых стенок ячейки.



1 – миллиамперметр; 2 – источник тока; 3 – вольтметр; 4 – измерительная ячейка размерами  $a$ ,  $b$ ,  $h$ ; А и В – внешние электроды; М и N – внутренние электроды

Рис. 2.4 Схема установки для определения удельного электрического сопротивления грунта в лабораторных условиях согласно ГОСТ 9.602-2016

Удельное электрическое сопротивление грунта определяют по четырехэлектродной схеме на постоянном или низкочастотном переменном токе (рис. 2.4). Внешние электроды с одинаковой площадью рабочей поверхности  $S_p$  поляризуют током определенной силы  $I_1$  и измеряют падение напряжения  $\Delta U_1$  между двумя внутренними электродами при расстоянии MN между ними.

Электрическое сопротивление грунта  $R_{г.л}$ , Ом, вычисляют по формуле

$$R_{г.л} = \frac{\Delta U_1}{I_1}, \quad (2.7)$$

где  $\Delta U_1$  – падение напряжения между двумя внутренними электродами,  $I_1$  – сила тока в ячейке.

Удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho$ , Ом·м, вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{R_{г.л} \times S_p}{l_{MN}}, \quad (2.8)$$

где  $R_{г.л}$  – электрическое сопротивление грунта, рассчитанное по формуле (2.7), Ом,  $S_p$  – площадь поверхности рабочего электрода,  $m^2$ ,  $l_{MN}$  – расстояние между внутренними электродами, м.

При использовании специальных приборов измерения электрического сопротивления грунта проводят в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора.

### *Недостатки рассмотренных методик*

Существенным недостатком представленных методик является нарушение структуры и характера влагонасыщения пробы относительно грунтов в естественных условиях залегания.

Для проведения измерений требуются подготовка образца определенной формы и размеров, его отстранение от определения других петрофизических параметров. Данные обстоятельства влекут за собой потерю времени и увеличение трудозатрат.

Методикой, лишенной описанных недостатков, является защищаемая методика измерения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов, основанная на использовании микроустановки Шлюмберже.

## **2.2 Методика измерения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов, основанная на использовании микроустановки Шлюмберже**

### **2.2.1 Исторический очерк**

С середины XX века микроустановка Шлюмберже применялась для измерения УЭС образцов неправильной формы, которые невозможно было разрезать на кубики без сильного нарушения их природной структуры (Ф. Фрич, 1965) [76].

Сначала установка располагалась на поверхности образца неправильной формы (рис. 2.5, а), измерялись разность потенциалов  $U_s$  и сила тока  $I_E$  в питающей цепи. Затем точно по форме геологического проводника создавался объем, который заполнялся водой с известным удельным электрическим сопротивлением. Электроды оставались на тех же местах, вновь измерялись разность потенциалов  $U'_s$  и сила тока  $I'_E$  в питающей цепи. Если  $\rho'$  – известное УЭС воды, то удельное сопротивление образца рассчитывалось по формуле

$$\rho = \frac{I'_E}{I_E} \cdot \frac{U_S}{U'_S} \rho' \quad (2.9)$$

Для того чтобы объем заполнить водой, применяли ящик, состоящий из двух частей (рис. 2.5, б, в). Нижнюю часть заливали воском и вдавливали образец в его расплав до половины. Затем устанавливали верхнюю часть ящика и также заливали воском. Перед установкой ящика на нижний слой воска укладывали бумагу, чтобы позднее можно было легко отделить обе части друг от друга. Когда воск застывал, верхнюю часть формы снимали и образец вынимали. Затем в воск в нужных местах помещали электроды, обе части формы клали друг на друга и уплотняли с боков. Получившееся таким образом пустое пространство заполняли раствором и проводили измерения.

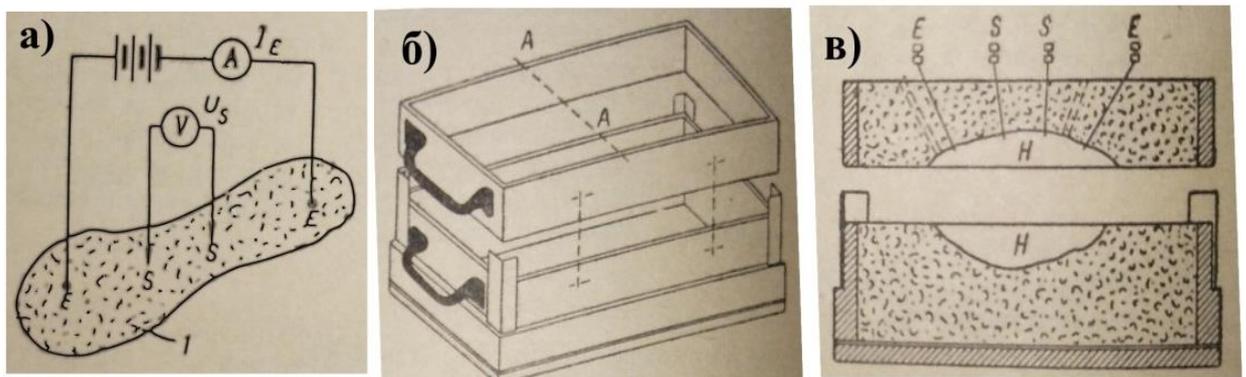


Рис. 2.5 Измерение УЭС образцов неправильной формы с помощью микроустановки Шлюмберже: а) – схема размещения установки, б), в) – измерительный ящик из двух частей

На сегодняшний день исследователи отмечают, что четырехэлектродная установка с линейным расположением электродов может применяется для измерения УЭС образцов произвольной формы, но поверхность, на которой располагают электроды, должна быть плоской (Н.Б. Дортман, 1984) [38]. Во избежание сильного влияния краев образца он должен быть, по крайней мере, вдвое больше размера установки (А.А. Редозубов, А.М. Виноградов, А.Н. Ратушняк, 2010) [64]. Измерения производят по схеме, представленной на рисунке 2.6.

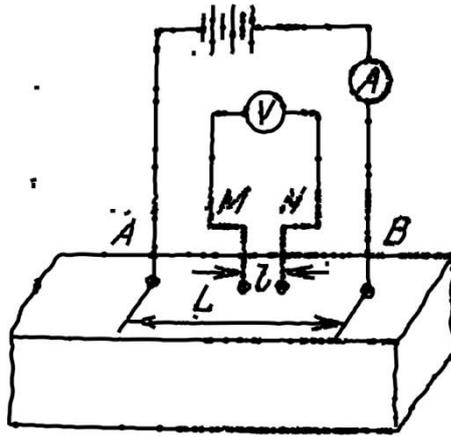


Рис. 2.6 Схема измерения УЭС образцов грунтов при помощи четырехэлектродной установки с линейным расположением электродов

Рассчитывают коэффициент установки  $K$  по формуле

$$K = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{4l}, \quad (2.10)$$

где  $L$  – расстояние между питающими,  $l$  – расстояние между измерительными электродами, или по формуле

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}. \quad (2.11)$$

Удельное электрическое сопротивление образца грунта вычисляют по формуле 2.5.

Однако, как показывает практика, результат измерения УЭС зависит от геометрических размеров образца грунта. При уменьшении его размеров наблюдается увеличение значения измеряемого электрического сопротивления. В литературе вопрос зависимости УЭС от размеров образца освещен недостаточно, для изучения этой зависимости выполнены следующие исследования.

### 2.2.2 Изучение влияния геометрических размеров образца на результаты измерений методами моделирования

Для изучения влияния геометрических размеров образца грунта на результаты определения его УЭС, выполнено численное и физическое моделирование.

*Численное моделирование* выполнено в программе ZondRes3D [43]. Исследования проведены на модели в форме параллелепипеда. Геометрические размеры модели изменялись с шагом 1–2 см в следующих пределах: длина  $L$  от 16,2 до 5 см, ширина  $D$  от 17,5 до 2,5 см, высота  $H$  от 17 до 1 см. Удельное электрическое сопротивление образца задано равным 30 Ом·м. Разнос питающей линии  $AB$  микроустановки Шлюмберже  $R$  составлял 5 см, размер приемной линии  $MN$  – 1 см. Характеристики модели образцов и разнос микроустановки  $AMNB$  выбраны исходя из наиболее встречаемых размеров керна, рядовых проб и простоты конструкции.

При построении трехмерной модели в программе ZondRes3D по оси  $X$  откладывалось значение длины образца, по оси  $Y$  и  $Z$  – ширины и высоты соответственно. На поверхности образца в центре параллельно оси  $X$  располагалась измерительная установка  $AMNB$  (рис. 2.7).

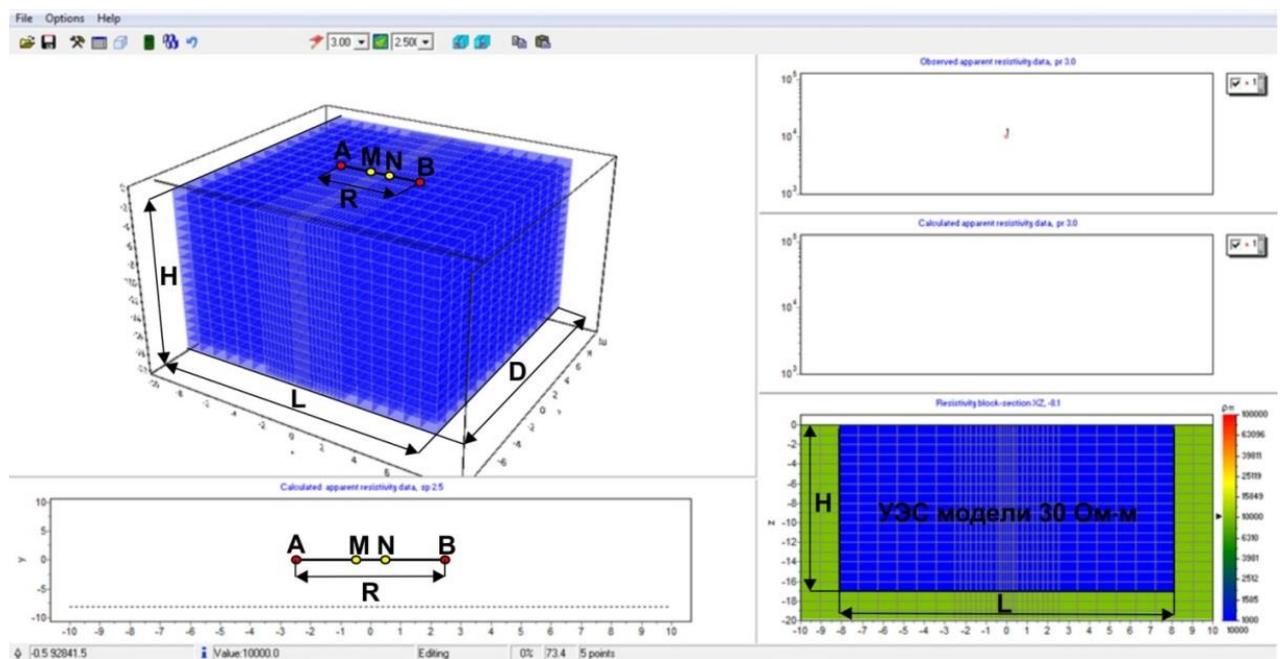


Рис. 2.7 Изображение модели образца в программе ZondRes3D

Над полученной трехмерной моделью решалась прямая задача, вычислялось значение кажущегося сопротивления. Затем попеременно симметрично относительно центра модели ее размеры уменьшались. После изменения геометрических размеров образца вычисления прямой задачи повторялись снова. В итоге для модели образца в форме параллелепипеда с

соответствующими геометрическими размерами рассчитано более 800 значений кажущегося сопротивления.

Как показывают результаты численного моделирования, чем больше размеры образца, тем больше вычисленное сопротивление стремится к его заданному УЭС. Уменьшение размеров образца приводит к увеличению получаемого сопротивления. Пример графиков зависимости, вычисленных при решении прямой задачи значений сопротивления от длины/ширины/высоты параллелепипеда при его прочих равных размерах, представлен на рисунке 2.8.

Согласно графикам, наибольшее влияние при измерении УЭС образца оказывает его длина, в меньшей степени – ширина и высота, что согласуется с теоретическими представлениями применения линейных установок (О. Куфуд, 1984) [51].

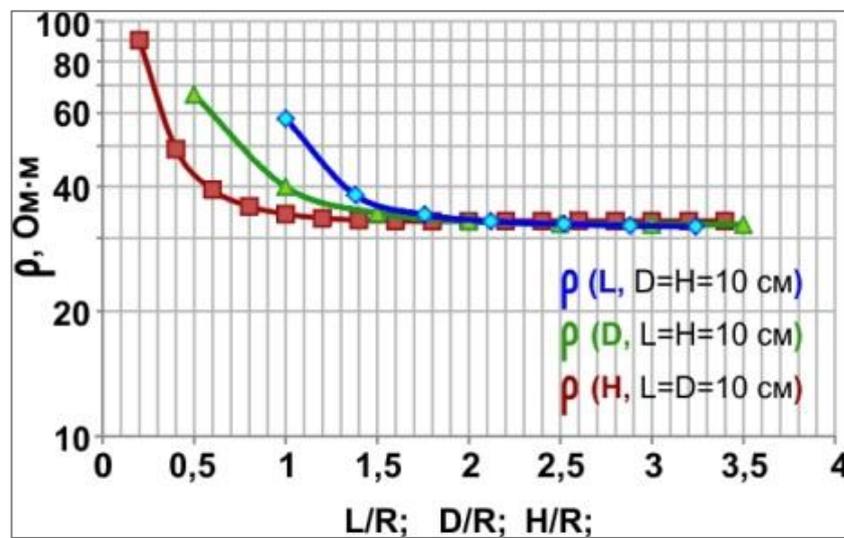


Рис. 2.8 Пример графиков зависимости сопротивления от длины/ширины/высоты параллелепипеда для установки АМNB с разномом  $R=5$  см по результатам численного моделирования

Зависимость УЭС от размеров образца объясняется повышением плотности тока вблизи приемной линии MN измерительной установки вследствие уменьшения объема, в котором может распространяться ток. Это, согласно формуле

$$\rho_k = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}, \quad (2.12)$$

где  $\rho_k$  – сопротивление, измеряемое на поверхности образца,  $\rho_{MN}$  – сопротивление грунта вблизи приемной линии MN,  $j_{MN}$  – плотность тока вблизи приемной линии MN,  $j_0$  – плотность тока в центре установки на поверхности образца, приводит к увеличению измеряемого сопротивления образца и погрешности определения его УЭС.

Отклонение измеренного УЭС образца от его истинного значения по результатам численного моделирования может быть рассчитано по формуле

$$\sigma = \frac{(\rho_k - \rho)}{\rho_k} \cdot 100\%, \quad (2.13)$$

где  $\rho_k$  – сопротивление, вычисленное на поверхности образца по результатам численного моделирования,  $\rho$  – заданное УЭС образца. Рассматриваемое отклонение измеренного УЭС от его истинного значения –  $\sigma$ , % – является методической погрешностью.

По результатам численного моделирования получена матрица значений отклонения УЭС образца от его геометрических размеров: длины, ширины и высоты. Рассчитанные значения отклонения УЭС визуализированы в системе программ «Зонд» [47] в качестве трехмерного отображения (рис. 2.9). Для удобства использования по осям отложены отношения длины L, ширины D и высоты H образца к величине разноса измерительной установки R. Сечения куба позволяют оценить отклонение измеренного сопротивления для образцов дисперсных грунтов правильной формы и соответствующих геометрических размеров. Так, 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 полученные результаты численного моделирования можно оценить отклонение значений сопротивления.

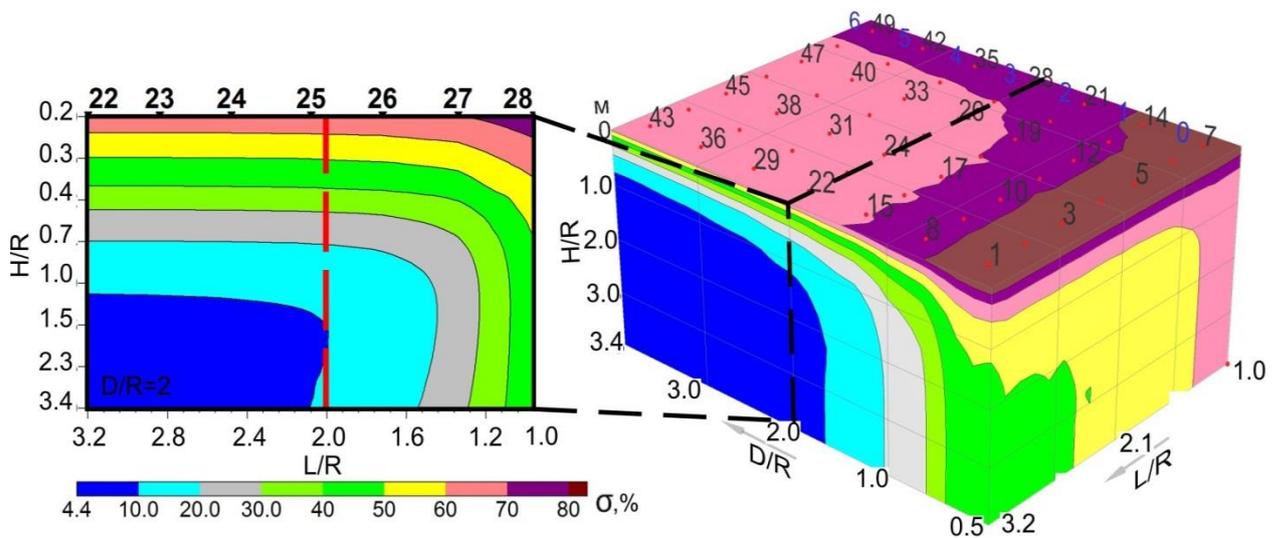


Рис. 2.9 Трехмерное отображение вычисленных значений отклонения УЭС для различных геометрических размеров образца (справа) и его сечение (слева). Красной линией обозначены отклонения для керна диаметром 10 см ( $R=5$  см) в зависимости от высоты пробы

Кроме того, была рассчитана зависимость отклонения измеряемого сопротивления от объема образца. Согласно рисунку 2.10, одному и тому же значению объема с различным соотношением длины, ширины и высоты образца могут соответствовать различные отклонения сопротивлений. Как и предполагалось, отклонение тем больше, чем меньше объем образца, что необходимо учитывать при выполнении измерений.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что измеряемое на поверхности образца грунта значение сопротивления зависит от его геометрических размеров. Отклонение измеряемых значений сопротивления от УЭС образца, рассчитанное по формуле 2.13, может варьироваться от единиц до 90%. При определении УЭС образцов дисперсных грунтов необходимо учитывать размеры пробы: ее длину, ширину и высоту. Наибольшее влияние при измерении установкой Шлюмберже оказывает его длина, в меньшей степени ширина и высота. На следующем этапе исследований выполнена заверка результатов трехмерного численного моделирования по средствам проведения физического моделирования.

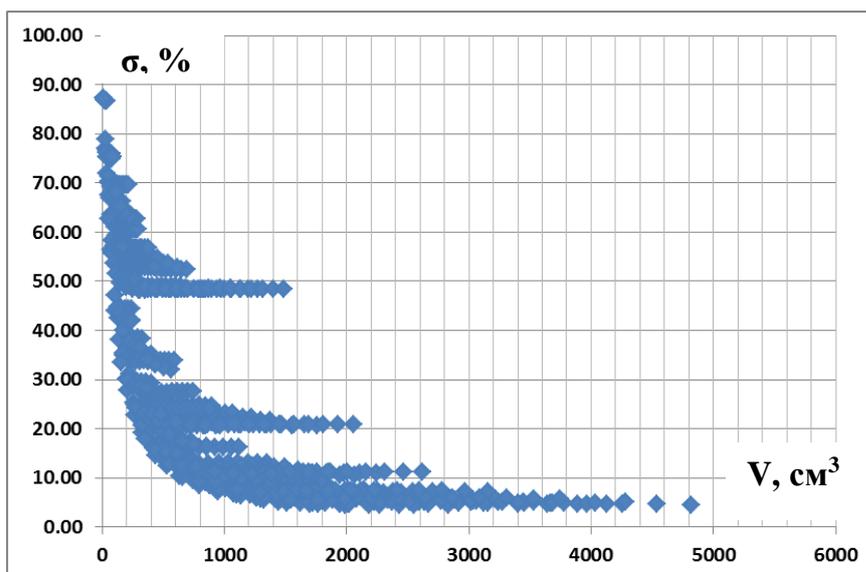


Рис. 2.10 Зависимость отклонения измеряемых значений сопротивления от объема образца по результатам численного моделирования

**Физическое моделирование** проводилось в грунтовой лаборатории фирмы ООО НИПППД «Недра». Исследования выполнены на ряде монолитов в форме цилиндра и параллелепипеда при естественной влажности грунтов. Наблюдения проводились по профилю монолитов с последовательным изменением их геометрических размеров. Измерения выполнены четырехэлектродной микроустановкой Шлюмберже аналогичных размеров ( $R=5$  см) с помощью цифрового аппаратно-программного комплекса АМС-1, обладающего повышенной помехозащищенностью и высокой точностью измерений [47]. Схема измерения на монолитах цилиндрической формы представлена на рисунке 2.11, наблюдения на образцах в форме параллелепипеда проводились согласно рисунку 2.6. Пример измерений на образце монолита тугопластичной глины, отобранного на одном из объектов исследования ООО НИПППД «Недра» в скважине № 5 с глубины 2,2 м, приведен на рисунке 2.12.

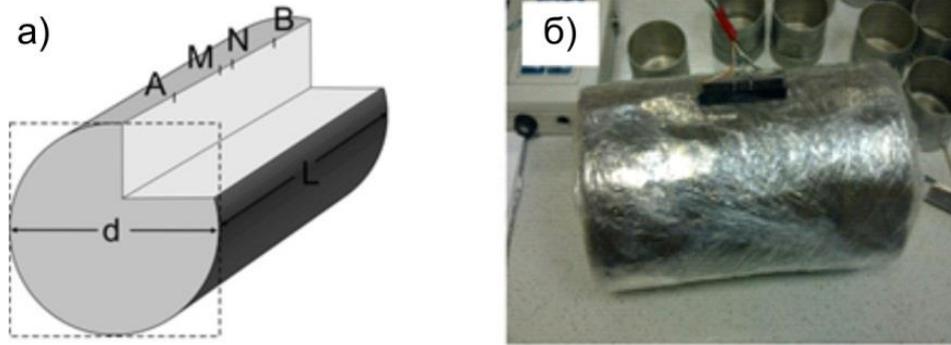


Рис. 2.11 Измерения на монолитах цилиндрической формы: а) – схема наблюдений, б) – проведение измерений на образце керна

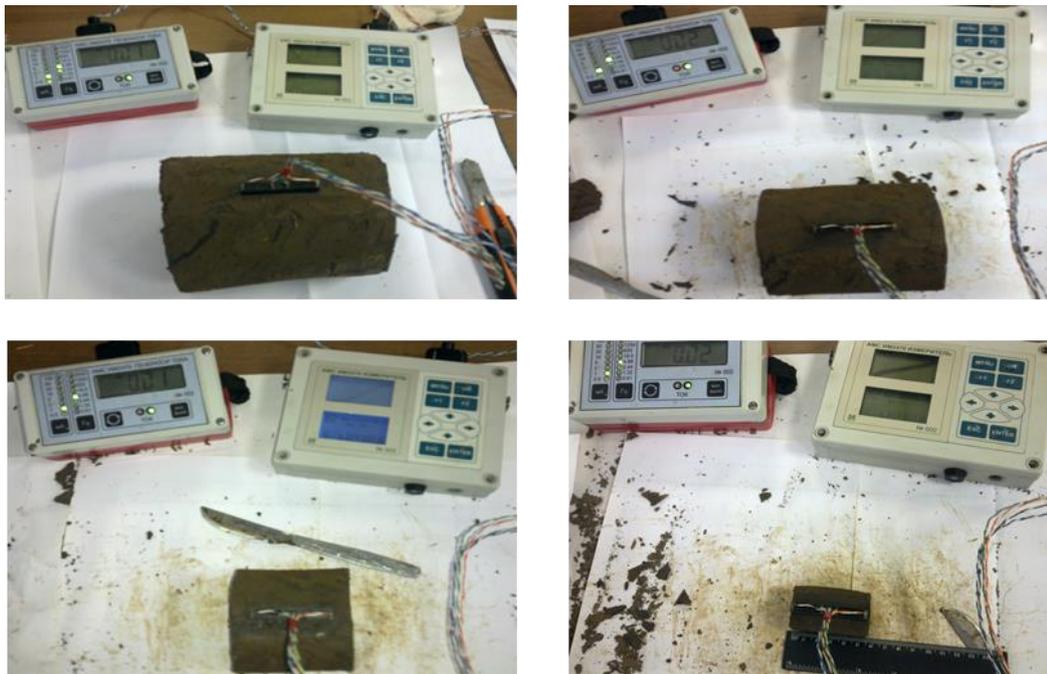


Рис. 2.12 Измерение удельного электрического сопротивления с изменением геометрических размеров образца дисперсного грунта, отобранного в скважине № 5

По результатам исследований были построены графики зависимости измеряемого сопротивления от объема, длины, ширины и высоты образцов дисперсных грунтов. Пример графика зависимости сопротивления от объема образца, отобранного в скважине № 5, изображен на рисунке 2.13.

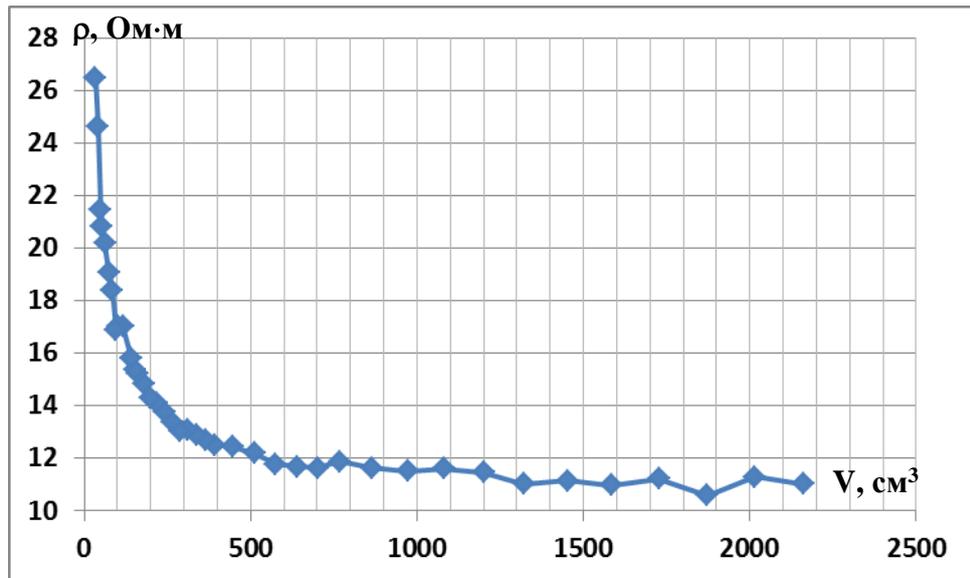


Рис. 2.13 График зависимость удельного электрического сопротивления от объема образца, отобранного в скважине № 5

В ходе обобщения результатов физического моделирования вычислены отклонения УЭС, измеренных на образцах, в зависимости от их геометрических размеров. По результатам моделирования построено распределение отклонений УЭС, в зависимости от геометрических размеров образца с равной шириной и высотой ( $D = H$ , Рис. 2.14). Определено, что при использовании установки АМНВ длиной 5 см и образцов, имеющих размеры менее 8 см в длину, 6 см высоту и ширину необходимо введение соответствующих поправок к измеренным значениям.

С помощью физического моделирования также исследован вопрос влияния анизотропии на результаты измерений. По статистике лабораторных наблюдений, большее влияние при определении УЭС образцов оказывают их геометрические размеры и наличие вблизи приемной линии относительно крупных включений обломочного материала, нежели анизотропные свойства. 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.

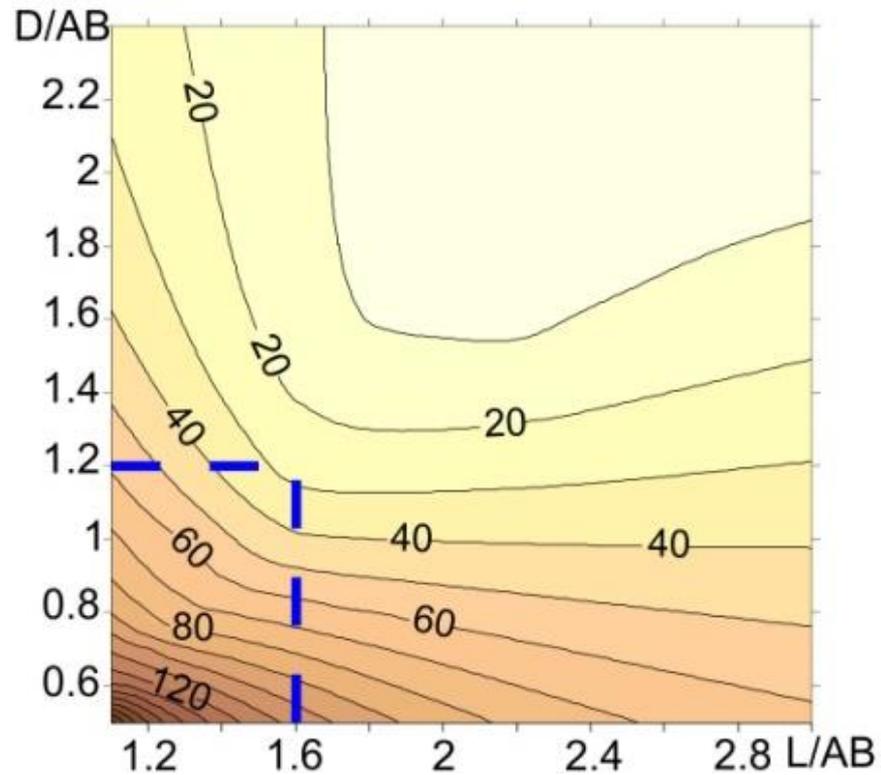


Рис. 2.14 Распределение отклонений УЭС в зависимости от геометрических размеров образца с равной шириной и высотой ( $D = H$ )

Результаты физического моделирования подтверждают данные численного моделирования [14]. Рассчитанная в ходе численного моделирования матрица значений отклонения УЭС образца от его геометрических размеров, совместно с данными лабораторных измерений, в дальнейшем может быть использована для нахождения более строгой аналитической зависимости с применением множественной регрессии.

Таким образом, исследована зависимость измеряемых удельных электрических сопротивлений образцов дисперсных грунтов от их геометрических размеров, получены распределения отклонений УЭС. Результаты выполненных исследований позволяют обосновать методику определения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов, основанную на использовании микроустановки Шлюмберже.

### 2.2.3 Методика измерений и аппаратура

Защищаемая методика позволяет определять удельное электрическое сопротивление монолитов и рядовых проб дисперсных грунтов правильной формы практически любых размеров, а также подземных и поверхностных вод, как в полевых, так и в лабораторных условиях. Для измерений не требуется специальной подготовки образцов. Наблюдения могут проводиться на только что отобранных или парафинированных и упакованных в полиэтилен образцах без нарушения их герметичности и сплошности, в более близких к пластовым условиям влагонасыщения. Для измерения УЭС грунтовых вод достаточно наличие емкости правильной формы.

Безусловно, петрофизические свойства грунтов в естественном залегании могут отличаться от их же свойств при атмосферном давлении. В настоящей работе речь идет, прежде всего, о том, что измерения и определение петрофизических параметров по защищаемой методике может выполняться на образцах, чьи свойства более близки к естественному залеганию в сравнении с применением других методик исследования, за счет меньшего нарушения сплошности грунта и изменения его влагонасыщения.

Измерения микроустановкой Шлюмберже могут выполняться с помощью любой серийной электроразведочной аппаратуры метода сопротивлений. Рекомендуемые размеры микроустановки AMNB составляют: разнос питающей линии АВ – 5 см, длина приемной линии MN – 1 см, и выбраны исходя из наиболее встречаемых размеров рядовых проб и простоты конструкции. Питающие и приемные электроды могут быть смонтированы на многопиновом разъеме типа BLD в виде съемных штырей, которые легко проходят через парафин или защитную пленку образца (рис. 2.15). Размер электродов, согласно [55], не должен превышать 10% от разноса установки.



Рис. 2.15 Вид четырехэлектродной микроустановки AMNB

Защищаемая методика имеет следующий порядок измерений:

1. Измерительная микроустановка AMNB размещается на поверхности вдоль образца, для уменьшения влияния его размеров, симметрично относительно остальных граней (рис. 2.6, 2.11). При измерении на парафинированных или обернутых в полиэтилен образцах, электроды заземляются сквозь парафин или пленку, что позволяет максимально сохранить сплошность и герметичность отобранной пробы грунта.

2. На низкочастотном переменном токе измеряется разность потенциалов  $\Delta U$  в приемной линии MN при заданном значении силы тока  $I$  в питающей линии АВ. Применение переменного тока стандартной частоты 4,88 Гц позволяет при этом избежать возникновения поляризационных эффектов и минимизировать индукционные наводки.

3. Наблюдаемое электрическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{н}} = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.14)$$

где  $K$  – геометрический коэффициент установки, вычисленный по формуле 2.10 или 2.11.

4. Измеряются геометрические размеры образца: его длина – L, ширина – D, высота – H.

5. По зависимостям, установленным в ходе моделирования (рис. 2.9, 2.14), определяется значение отклонения  $\sigma$  наблюдаемого сопротивления  $\rho_n$  от истинного УЭС образца  $\rho$ .

6. Удельное электрическое сопротивление образца рассчитывается путем введения методической поправки за влияние его геометрических размеров по формуле

$$\rho = \rho_n \left(1 - \frac{\sigma}{100\%}\right), \quad (2.15)$$

где  $\sigma$  – отклонение наблюдаемого сопротивления образца от его истинного значения, определенное по установленным зависимостям. Критические размеры образцов, при которых необходимо введение поправок в результаты измерений, составляют: длина –  $1,6R$ , ширина и высота –  $1,2R$ , где  $R$  – значение разноса измерительной микроустановки Шлюмберже. В случаях, когда размеры образцов превышают указанные значения, отклонение измеренных значений УЭС находится в рамках погрешности полевых измерений.

7. При измерениях на однородных образцах, коэффициент микроанизотропии  $\lambda$  близок к 1. Измерения, когда установка АМNB располагается вдоль зерна или рядовой пробы, являются достаточными для определения удельного электрического сопротивления грунта. Рассчитанное в пункте 6 удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho$ , соответствует  $\rho_l \approx \rho_n \approx \rho_m$ .

8. При наблюдениях на образцах, существенно отличающихся по составу от однородных, измерения (по возможности) проводятся на торце монолита или пробы. Определяется среднее квадратическое удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho_m$ , соответствующее значениям УЭС, получаемых в ходе количественной интерпретации данных поверхностных

зондирований, согласно пунктам 2-6 данной методики. Коэффициент микроанизотропии  $\lambda$  вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{\rho_m}{\rho_l}, \quad (2.16)$$

где  $\rho_m$  – среднеквадратическое удельное электрическое сопротивление грунта,  $\rho_l$  – продольное удельное электрическое сопротивление грунта.

9. При определении УЭС грунтовых и поверхностных вод, отобранная проба жидкости заливается в емкость правильной формы, измерительная микроустановка Шлюмберже располагается вдоль ее длинной стороны, в центре, симметрично относительно стенок. Измерения проводятся аналогично пунктам 2-6 описываемой методики.

10. Полученные значения удельных электрических сопротивлений в дальнейшем используются для оценки петрофизических характеристик грунтов и минерализации грунтовых и поверхностных вод по имеющимся зависимостям (А.А. Огильви, В.А. Шевнин, А.А. Рыжов); построения корреляционных связей между измеренными УЭС и петрофизическими характеристиками, определяемыми в ходе лабораторных измерений на данных образцах. Для увязки результатов лабораторных измерений и данных полевых наблюдений требуется введение поправки за влияние температуры.

### **2.3 Апробация и опыт применения защищаемой методики**

Защищаемая методика апробирована и успешно внедрена в производственный процесс на предприятии ООО НИПППД «Недра». По результатам многочисленных исследований, проведенных в грунтовой лаборатории предприятия в течении более чем 5 лет, получены распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов для Приволжского и Северо-Западного Федеральных округов (рис. 2.16).

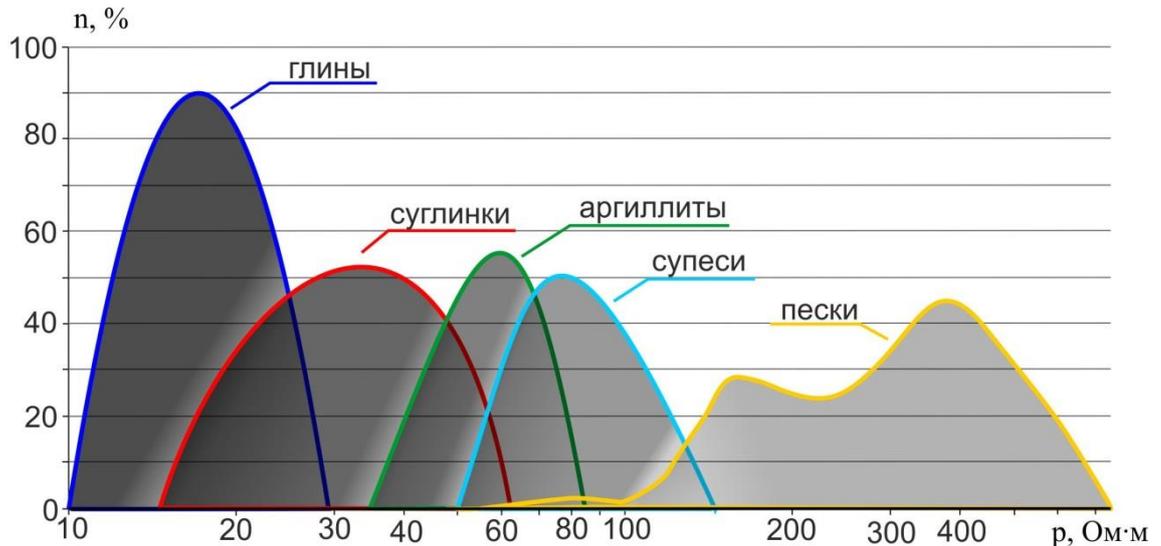


Рис. 2.16 Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов для Приволжского и Северо-Западного федеральных округов ( $n$  – частота встречаемости образцов с определенным УЭС от их общего количества для каждого типа грунтов, %;  $T = 20^{\circ}\text{C}$ )

Для статистики были взяты более 100 значений сопротивлений для каждой группы грунтов. Согласно рисунку 2.16, из представленного массива данных 90 % глин имеют сопротивление до  $20^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Для большего числа суглинков сопротивлений находится в пределах  $20\text{--}50^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Аргиллиты преимущественно характеризуются значениями УЭС в диапазоне  $50\text{--}70^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$ , для большего числа супесей сопротивление составляет  $80^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Распределение УЭС песков характеризуется наличием двух максимумов в диапазонах  $120\text{--}150^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$  и  $350\text{--}400^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$ , что связано с различной степенью водонасыщения грунтов. Наименьшие значения сопротивлений песков  $60\text{--}100^{\circ}\text{Ом}\cdot\text{м}$  указывают на повышение содержания глинистого материала. Необходимо отметить, что минерализация поровой влаги образцов грунтов в большинстве случаев составляла  $0,1\text{--}0,3$  г/л, значения сопротивлений измерены при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ . Подобные построения также выполнены для грунтов Уральского и Дальневосточного федеральных округов.

Полученные значения сопротивлений использовались для построения зависимостей УЭС грунтов от литологического состава и общезфизических

свойств. По зависимостям, в дальнейшем, на этапе геологического истолкования геофизических данных выполнялось уточнение физико-геологических моделей, необходимое для оценки инженерно-геологических условий при решении широкого круга задач. Более подробно пример применения защищаемой методики для определения петрофизических характеристик грунтов и уточнения ФГМ изложен ниже в главе 3 настоящей работы [14].

## 2.4 Выводы к главе 2

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Выполнено совершенствование методики измерения УЭС образцов дисперсных грунтов и грунтовых вод, позволяющее избежать потери времени для подготовки образца, использовать серийную электроразведочную аппаратуру, что существенно сокращает трудозатраты и потерю времени на измерения.

2. Основное преимущество заключается в том, что наблюдения могут быть выполнены как в лабораторных, так и в полевых условиях на монолитных образцах и рядовых пробах произвольных размеров без нарушения их герметичности и сплошности в близких к пластовым условиям влагонасыщения.

3. С помощью моделирования проведены исследования зависимости величины измеряемого УЭС от геометрических размеров образца. По результатам расчетов построены распределения отклонений УЭС от истинных значений. При параметрах образца меньших определенных значений, требуется введение методической поправки в величину измеренного УЭС.

4. Выполнено апробирование методики при изучении распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов по Приволжскому, Северо-Западному, Уральскому и Дальневосточному федеральным округам. Полученные данные успешно применяются для

построения и уточнения ФГМ на этапе физико-геологического истолкования геофизических данных при решении широкого круга задач.

Таким образом, во второй главе диссертации приведено 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»*. Защищаемая методика внедрена в производство на предприятии ООО НИПППД «Недра». Материалы исследований представлены в публикациях [1, 8, 10, 14].

### ГЛАВА 3

#### Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов методами электротометрии

В главе 3 диссертации приводится пример практического опробования защищаемой методики измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов при поиске и оценке перспективности месторождений грунтовых строительных материалов вокруг семи месторождений углеводородного сырья Тюменской области: Западно-Эпасского, им. Малыка, Косухинского, Протозановского, Северо-Тамаргинского, Северо-Тямкинского, Тальцийского (рис. 3.1).

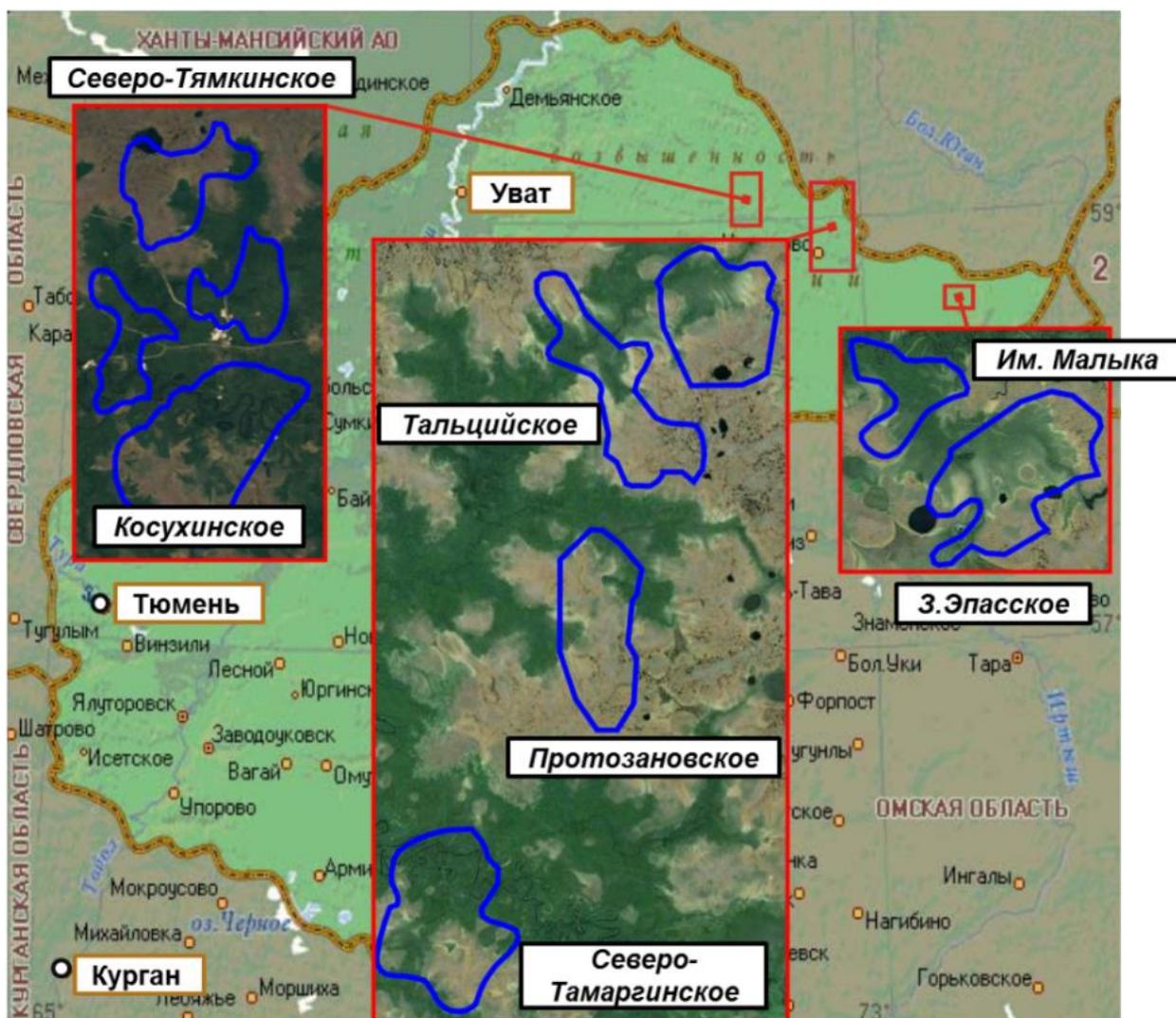


Рис. 3.1 Обзорная схема района работ с нанесенными обобщенными контурами месторождений углеводородного сырья

### **3.1 Общие сведения, актуальность, проблематика**

#### **3.1.1 Актуальность и проблематика исследований**

Развитие минерально-сырьевой базы неразрывно связано с освоением новых и доразведкой существующих месторождений полезных ископаемых. Увеличение объемов и темпов добычи ресурсов углеводородов требуют развитой инфраструктуры. Основой рационального и эффективного использования богатств недр и научного планирования геологоразведочных работ является комплексная оценка ресурсов углеводородного сырья и минеральных строительных материалов [62].

Ведущее положение в топливно-энергетическом комплексе страны занимают регионы Западной Сибири, где добывается более 70% нефти, 90% газа, 50% торфа и 30% каменного угля. Реализация топливно-энергетического потенциала региона создает потребность в строительных материалах. Однако большая часть территории региона покрыта труднопроходимыми лесами и болотами, мощность торфа в которых зачастую достигает двух и более метров. Поэтому крупные месторождения строительных материалов развиты на юге Западной Сибири (Алтайский край, Кемеровская область) или приурочены к аллювиальным отложениям крупных рек, таких как Обь и Иртыш. Для эффективной реализации промышленного потенциала региона необходимо учитывать совокупность экономико-географических, горно-геологических, технических и других факторов производства [62].

*Актуальность* данных исследований связана с необходимостью рационального освоения сырьевой базы указанных семи нефтяных месторождений Тюменской области: Западно-Эпасского, им. Малыка, Косухинского, Протозановского, Северо-Тамаргинского, Северо-Тямкинского и Гальцийского.

*Проблематика* исследований заключается в наличии сложных климатических (рис. 3.2), инженерно-геологических условий и слабом развитии инфраструктуры:

- континентальный климат с холодной и продолжительной зимой;
- болотистая местность;
- большой объем грунтов представлен слабыми грунтами глинистого состава;
- промышленные скопления песчаных и песчано-гравийных грунтов могут быть развиты преимущественно вблизи русла реки Демьянки и ее более мелких притоков;
- дорожная сеть представлена редкими грунтовыми дорогами летом и зимниками в холодное время года;
- электроснабжение производится от дизельных электростанций.



Рис. 3.2 Климатические и гидрогеологические условия района работ на момент проведения исследований (апрель-май 2012 г.)

Перечисленные особенности территории необходимо учитывать при планировании геологоразведочных работ, дальнейшего освоения и разработки месторождений как углеводородного сырья, так и грунтовых строительных материалов.

Дополнительным отягчающим фактором в условиях рыночной экономики являлась необходимость проведения поисковых работ на территории большой площади – зон радиусом 20 км от центра месторождений – в сжатые сроки.

В настоящее время Протозановское месторождение стало центром объединения в единый кластер шести соседних месторождений Недропользователя, что позволяет производить их разработку более эффективно, пользоваться единой инфраструктурой и оптимизировать затраты на освоение. Кроме того, от месторождения построен магистральный газопровод Протозановское месторождение – Усть-Тегусское месторождение – Кальчинское месторождение. Учитывая значимость Протозановского нефтяного месторождения, результаты инженерно-геофизических исследований (графические материалы и таблицы) представлены на его примере.

### **3.1.2 Общая характеристика участка работ в районе Протозановского нефтяного месторождения**

В административно-территориальном отношении участок исследований расположен на территории Уватского района Тюменской области вблизи Протозановского нефтяного месторождения.

Географически участок исследований расположен в южной части Западно-Сибирской равнины, на правом берегу р. Иртыш, на возвышенности Тобольский материк, который представляет собой слаборасчлененную заболоченную и залесенную местность, изрезанную множеством рек и ручьев с отдельными незначительными возвышениями. Наиболее крупная из них р. Демьянка.

В геоморфологическом отношении район расположен в юго-западной части Западно-Сибирской аккумулятивной равнины [42].

Климат рассматриваемой территории континентальный, с холодной продолжительной зимой, теплым, но сравнительно коротким летом, ранними осенними и поздними весенними заморозками. Зимой часто наблюдается антициклон с сильно охлажденным воздухом.

Рельеф на территории месторождения равнинный с отдельными возвышениями, с незначительным перепадом высот. Поверхность представляет собой слаборасчлененную, в разной степени заболоченную, озерно-аллювиальную и аллювиальную равнину.

Территория месторождения расположена в таежно-болотистой местности. Растительный покров представлен хвойными лесами: кедром, елью, пихтой, сосной; а также лиственными породами: осиной, березой. Заболоченные участки, в основном, покрыты угнетенным низкорослым лесом и мелким кустарником. Надпочвенный покров представлен сфагновыми мхами, брусничником. На заболоченных участках в надпочвенном покрове моховых гряд – сфагнум, багульник, кассандра, в мочажинах растет сфагнум, пушица.

Согласно литературным данным [42] верхняя часть геологического разреза представлена верхнеплейстоцен-нижнечетвертичными отложениями, озерно-аллювиальными отложениями средне-верхнечетвертичного и верхнечетвертичного возраста, перекрытыми современными отложениями болот, озер и пойм водотоков.

Озерно-аллювиальные отложения четвертичных надпойменных террас слагают верхнюю ступень террасового комплекса долины реки Демьянка, ложбины стока и днища ящикообразных долин малых рек в пределах междуречной равнины. Отложения залегают с глубоким эрозионным размывом на породах диапазона позднего олигоцена (туртасская свита) – среднего плейстоцена (сузгунская толща).

В гидрогеологическом отношении район работ расположен в пределах центральной части Западно-Сибирского артезианского бассейна. По имеющимся данным в разрезе платформенного чехла выделяется два гидрогеологических комплекса, разделенных региональным водоупором, представленным мощной глинистой толщей верхнемелового и палеогенового возраста.

Сведения о ранее проводимых инженерно-геологических изысканиях на данной территории отсутствуют.

### **3.2 Методика инженерно-геофизических исследований**

Основную информацию о местонахождении и перспективах нерудных полезных ископаемых (в том числе и строительных материалах) дают картировочно-поисковые съемки с привлечением геофизических методов. При детальной разведке нерудных полезных ископаемых геофизические методы повышают эффективность геологических работ и позволяют уменьшить объем бурения (В.К. Хмелевской) [24]. Одним из ведущих направлений в поисково-разведочной геофизике является группа методов электротометрии. Получаемая с их помощью информация также может быть использована для проектирования инфраструктуры разрабатываемого месторождения [4, 53].

Геофизические исследования методами электротометрии проводились в составе инженерно-геологических изысканий с целью повышения оперативности геологоразведочных работ при поиске месторождений грунтовых строительных материалов, определения геологического строения и физических свойств грунтов и уточнения инженерно-геологических условий на изыскиваемых перспективных участках. В задачи входило картирование территории, постановка буровых работ и оценка перспективности грунтов.

Поисковые работы проводились последовательно в радиусе 5, 10, 15, 20 км от центра указанных выше месторождений. По своей структуре исследования можно разделить на два этапа согласно задачам: поисковой и

оценочный. На поисковом этапе по геофизическим исследованиям выполнен прогноз перспективных участков и проектирование поисково-оценочного бурения. Оценочный этап включал бурение скважин на выделенных участках, лабораторные исследования, уточнение геоэлектрической модели и, собственно, оценку перспективности использования встреченных грунтов в качестве строительных материалов.

Стадийность геофизических исследований в составе геологоразведочных работ следующая:

1. Поисковый этап:

- выполнение полевых электроразведочных работ по рекогносцировочным геологическим профилям;
- обработка и интерпретация результатов профильных наблюдений;
- выявление перспективных участков;
- выполнение площадных электроразведочных наблюдений на территории перспективных участков;
- обработка и предварительная количественная интерпретация результатов площадных наблюдений;
- построение прогнозных карт процентного содержания глинистого материала;
- постановка буровых работ;

2. Оценочный этап:

- выполнение лабораторных исследований;
- построение зависимостей УЭС образцов грунтов от их петрофизических характеристик;
- корректировка геоэлектрической модели среды с учетом результатов бурения и лабораторных исследований;
- построение окончательных карт процентного содержания глинистого материала;
- подсчет объемов грунтов различного литологического состава.

### **3.2.1 Методика и техника полевых электроразведочных работ**

Полевые электроразведочные работы проводились методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с использованием четырехэлектродной симметричной измерительной установки Шлюмберже. Выбор классического метода обусловлен высокой мобильностью, низкими трудозатратами и оптимальным соотношением между требуемой детальностью и стоимостью работ.

Значения разносов питающей линии АВ менялись до 60 м с шагом, соответствующим десяти точкам на модуль билогарифмического бланка. Измерения проводились с помощью одной приемной линии  $MN = 2$  м и цифрового аппаратурно-программного комплекса АМС-1, обладающего повышенной помехозащищенностью и высокой точностью измерений [47]. Геофизическая съемка проводилась в масштабах 1:10 000 – 1:20 000. Для каждой точки ВЭЗ выполнена планово-высотная привязка. Полевые электроразведочные работы выполнены в соответствии с требованиями основных нормативных документов [34, 65, 72, 73]. Местоположение и контуры выделенных перспективных участков согласованы с недропользователем.

### **3.2.2 Методика обработки и интерпретации полевых электроразведочных материалов**

Обработка и интерпретация результатов электрического зондирования осуществлялась с помощью автоматизированной интерактивной системы «Зонд» (В.П. Колесников, В.А. Кутин, С.В. Мокронос) [47].

Система «Зонд» включает следующие графы обработки и интерпретации:

1. Визуализация и корректировка исходных данных;
2. Первичная обработка результатов наблюдений;
3. Качественная интерпретация;
4. Количественная интерпретация;
5. Анализ параметрических зондирований;

6. Расчет геоэлектрических параметров для заданной части геоэлектрического разреза;

7. Пересчет электрических параметров в другие физические характеристики среды (минерализацию, скорости, плотности) на основе использования корреляционных связей;

Каждый из этапов автоматизирован и содержит блок визуализации, предназначенный для организации интерактивного режима работы и графической выдачи результатов в виде графиков, разрезов, карт и объемных отображений расчетных и наблюдаемых полей.

Интерактивный режим работы обеспечивает возможность контроля и корректировки результатов работы отдельных ее блоков с целью выбора оптимального варианта построения исследуемой модели среды.

Качественная интерпретация представляет собой вычисление и визуализацию эффективных параметров, как в плане (карты), так и по вертикали (разрезы). По предлагаемому «меню» может быть выполнен расчет следующих эффективных параметров: кажущихся сопротивлений ( $\rho_k$ ), кажущихся проводимостей ( $S_k$ ), дифференциальных значений кажущегося сопротивления ( $\Delta\rho_k$ ), полных нормированных градиентов ( $G$ ).

Реализация процесса количественной интерпретации ориентирована на учет ряда принципов, сформировавшихся в результате обобщения известных теоретических наработок и опыта производства электроразведочных работ: 1) интегрального принципа, основанного на согласованной интерпретации совокупности зондирований; 2) принципа учета информационных возможностей метода при формировании интерпретационных моделей; 3) принципа разделения физического и геологического этапов истолкования; 4) принципа понижения модельной размерности, одним из элементов которого является выбор наиболее простых моделей в рамках модельной эквивалентности, отвечающих регулярной части поля и геологическим представлениям о разрезе; 5) статистического принципа оценки и принятия

решений; б) принципа эквивалентности, учитывающего пределы и закономерности изменения параметров эквивалентных решений.

Реализация процесса повышения однозначности осуществляется на основе согласованной интерпретации зондирований с использованием для стабилизации получаемых решений как количественной (опорные решения), так и качественной (сведения о гладкости границ и т. п.) априорной информации.

Алгоритм учитывает два варианта формирования опорных решений:

1) при наличии параметрического материала (результаты бурения, электрического каротажа и т. п.) и 2) при его отсутствии. Для реализации первого варианта создан специальный блок количественной интерпретации параметрических зондирований, расположенных вблизи скважины, с визуализацией геологической информации и результатов решения обратной задачи. Данный блок позволяет в интерактивном режиме в рамках решений, отвечающих уровню погрешности полевых наблюдений ( $\delta$ ), выбирать решение, наиболее согласующееся с априорными представлениями о разрезе в рамках информативности метода.

На следующем этапе оптимизации модели предусмотрена возможность сглаживания геоэлектрических границ в рамках  $\delta$ -эквивалентности.

Процесс сглаживания выполняется в интерактивном режиме при разных пределах сглаживания с визуализацией, получаемой при этом геоэлектрической модели среды. Контроль оптимальности сглаживания осуществляется визуально с учетом величины средней погрешности расхождения наблюденного и расчетного полей.

При отсутствии параметрических зондирований предусмотрен статистический вариант выбора опорных решений.

Геологическое истолкование физических решений рассматривается как задача выбора геологической гипотезы строения среды в рамках возможных физических решений, адекватных информативности метода исследования.

Технологически построение физико-геологической модели представляет итерационный процесс, выполняемый при участии интерпретатора. Работа интерпретатора сводится к формированию опорных решений, заданию управляющих параметров, представляющих ограничения на пространственное изменение физических параметров среды, и выбору наиболее оптимального варианта конструируемой модели. Аномальные эффекты, не укладывающиеся в рамки квазигоризонтально-слоистой модели среды и отображаемые в виде поля остаточных аномалий, классифицируются как локальные неоднородности либо помехи по совокупности признаков: величине коэффициентов прослеживаемости, пространственной согласованности, достоверности результатов.

Расчет геоэлектрических параметров для заданной части разреза имеет целью изучение геоэлектрических характеристик среды на заданных интервалах глубин. Блок расчета геоэлектрических параметров позволяет вычислять значения удельного электрического сопротивления и продольной проводимости, как между любыми заданными границами, так и между двумя произвольно заданными «срезами», а также значения глубины до заданной границы в абсолютных отметках.

Обработка и интерпретация профильных наблюдений, а также обработка и предварительная количественная интерпретация площадных наблюдений выполнена без данных бурения, ввиду их отсутствия. Построение окончательной геоэлектрической модели среды проведено с учетом данных бурения скважин и результатов лабораторных исследований. В ходе анализа параметрических зондирований выполнена привязка геоэлектрических горизонтов к выделенным инженерно-геологическим элементам, что уменьшило неоднозначность решения обратной задачи и позволило более точно определить УЭС и оценить петрофизические характеристики литологических разностей.

### 3.2.3 Методика построения прогнозных карт глинистости и постановка буровых работ

Прогнозные карты процентного содержания глинистого материала строились на основании результатов предварительной количественной интерпретации площадных электроразведочных работ с учетом поправок за температуру и минерализацию грунтовых вод, полученных в ходе рекогносцировочной геологической съемки, по известным корреляционным зависимостям (рис. 3.3, 3.4).

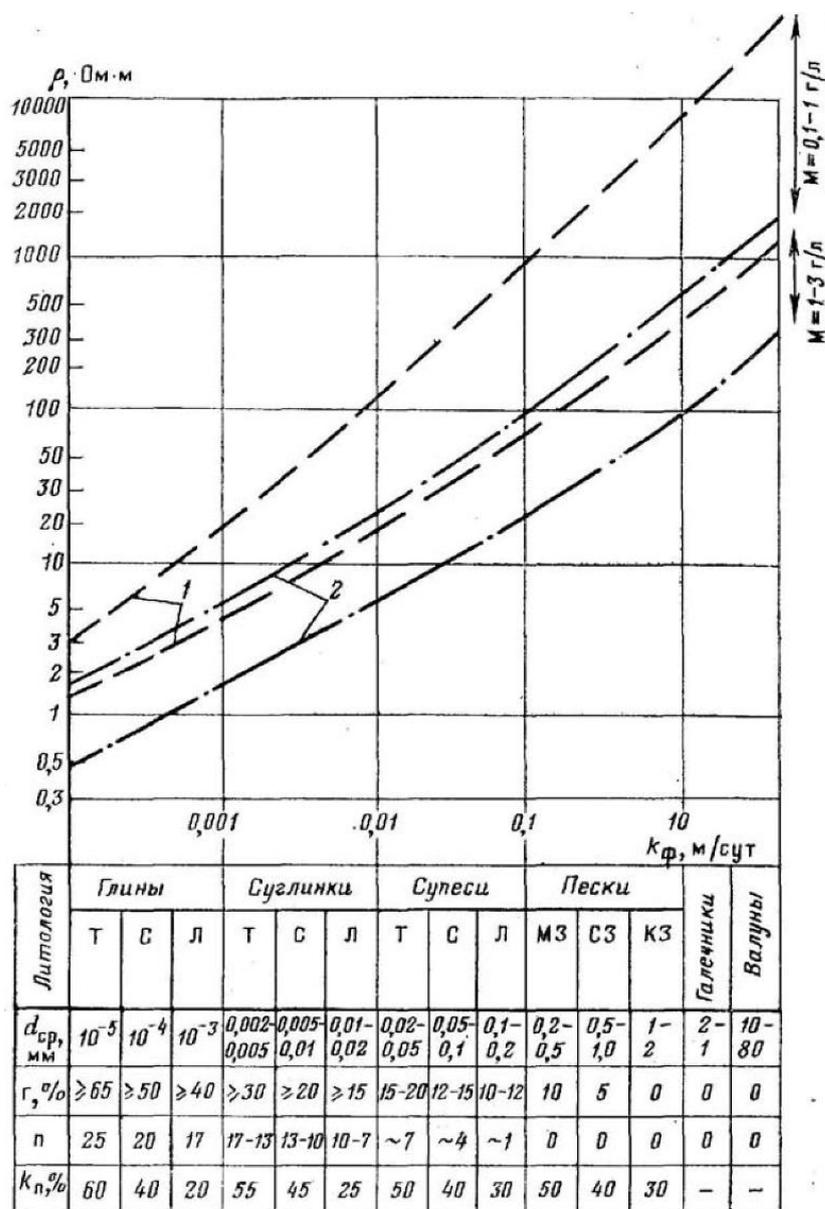


Рис. 3.3 Зависимость УЭС рыхлых пород при разной минерализации подземных вод от их литологического состава для (1) естественной влажности и (2) полной водонасыщенности (А.А. Огильви, 1990) [57]

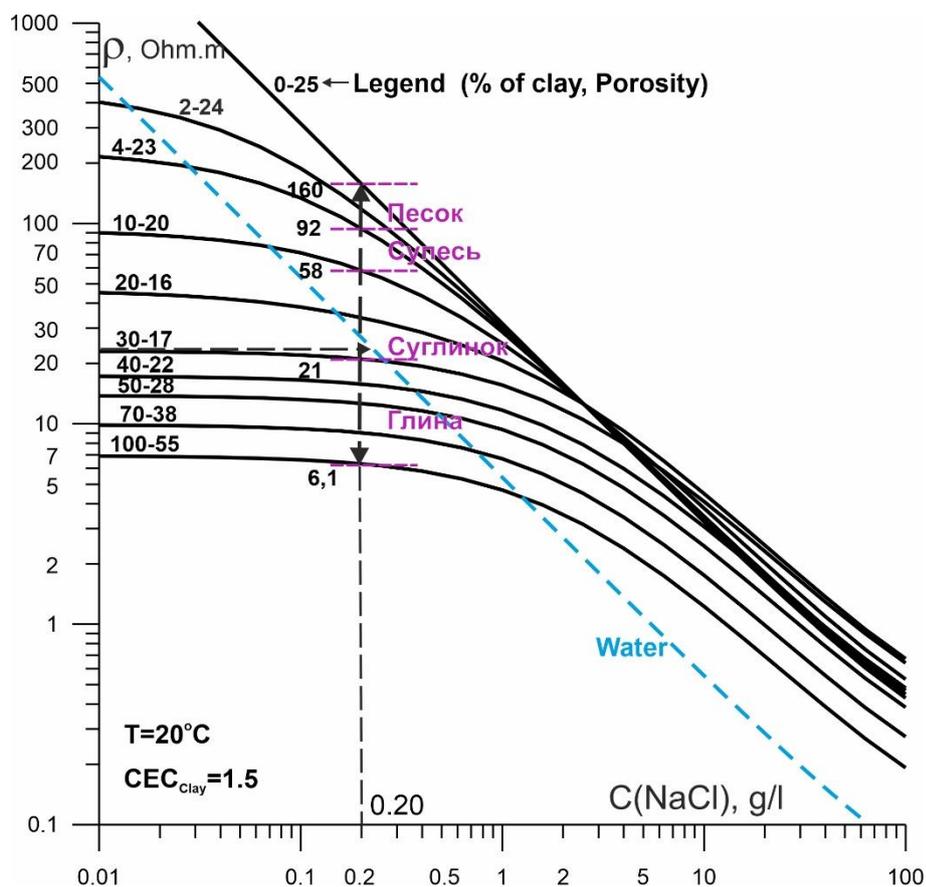


Рис. 3.4 Палетка А.А. Рыжова, рассчитанная В.А. Шевниным (ЕКО=1,5 г/л)

Постановка буровых работ выполнена на участках наибольшего изменения электрических и петрофизических свойств грунтов.

### 3.2.4 Методика лабораторных исследований

В ходе лабораторных исследований при измерении на парафинированных монолитах, полноразмерных образцах керна, рядовых пробах и отобранных пробах воды выполнено определение УЭС образцов дисперсных грунтов и грунтовых вод. Измерения производились в соответствии с методикой, описанной в главе 2 настоящей работы.

Лабораторные исследования петрофизических характеристик проб грунтов проведены в соответствии с действующими ГОСТами [27-34].

По результатам лабораторных исследований построены зависимости удельного электрического сопротивления для всех встреченных видов дисперсных грунтов от их петрофизических характеристик, определены граничные значения УЭС различных литологических разностей.

### 3.2.5 Методика подсчета объемов грунтов

По результатам бурения и лабораторных исследований выполнена корректировка геоэлектрической модели среды, на основании граничных значений диапазонов изменения УЭС грунтов различного литологического состава построены окончательные карты процентного содержания глинистого материала.

Подсчет объемов грунтов с соответствующим содержанием глины для каждого перспективного участка выполнен по результатам количественной интерпретации площадных наблюдений методов ВЭЗ с учетом мощностей геоэлектрических горизонтов по формуле

$$V_{лр} = \sum_1^n h_{илр} \cdot S_{илр}, \quad (3.1)$$

где  $V_{лр}$  – объем грунта конкретной литологической разности,  $h_{илр}$  – мощность геоэлектрического горизонта, соответствующего данной литологической разности, на  $i$ -й точке вертикального электрического зондирования,  $S_{илр}$  – площадь  $i$ -й точки ВЭЗ в соответствии с масштабом съемочной сети,  $n$  – количество пикетов ВЭЗ, на которых залегают грунты данного литологического состава.

Далее на основании результатов расчетов по каждому перспективному участку вычислялись суммарные объемы грунтов с различным содержанием глины для зон радиусом 5, 10, 15 и 20 км вокруг соответствующих месторождений углеводородного сырья. Помимо песчано-глинистых грунтов также выполнен подсчет объемов торфяных залежей.

### 3.3 Результаты инженерно-геофизических исследований

Электроразведочные наблюдения выполнены методом вертикального электрического зондирования. В общей сложности в зонах радиусом 20 км вокруг семи перечисленных месторождений отработано более 1500 физических точек с шагом съемочной сети, соответствующим масштабам 1:10 000–1:20 000, площадь исследованной территории равна 90 км<sup>2</sup>, объем

исследованных грунтов – 700 млн. м<sup>3</sup>. Глубина исследования методом ВЭЗ составила 15 м, бурение скважин проводилось до глубины 10 м.

На этапе обработки и интерпретации была получена геоэлектрическая модель среды без учета априорной информации, отражающая особенности строения и изменения электрических свойств грунтов, залегающих до глубины 15 м.

По данным предварительной количественной интерпретации верхняя часть разреза до глубины 1-2 м характеризуется повышенными значениями удельного электрического сопротивления 50-650 Ом·м, что соответствует отложениям почвенно-растительного слоя и торфа. Подстилающие грунты обладают сопротивлением 10-30 Ом·м, что позволяет предполагать глинистый состав отложений. В интервале глубин 2–5 м, а также с глубины 10 м отмечаются области незначительного повышения сопротивления до 50–200 Ом·м, что связано с увеличением содержания песчаного материала, включениями гравия и органических останков в исследуемом массиве пород.

Проведенные электроразведочные работы позволили выполнить пересчет удельного электрического сопротивления грунтов в процентное содержание глинистого материала по средствам использования известных корреляционных зависимостей [57, 73] и палетки, рассчитанной В.А. Шевниным для условий  $EKO=1,5$  г/л (рис. 3.4), с учетом температуры при минерализации воды 0,1 г/л. Значение минерализации предварительно определено при измерении УЭС проб поверхностных вод по защищаемой методике, описанной в главе 2 настоящей работы.

Прогноз выполнен согласно принятой классификации грунтов в зависимости от процентного содержания глин. Таким образом, проведено картирование исследуемой территории, в ходе которого определены участки, перспективные на содержание различных грунтовых строительных материалов. В общей сложности выделено более 80 перспективных участков для семи нефтяных месторождений.

Для постановки буровых работ на перспективных участках были построены карты прогнозного содержания глинистого материала в интервалах глубин 2–5 м, 5–10 м и 10–15 м. Области наибольшего изменения свойств грунтов были рекомендованы для проходки геологических выработок. Пример карты прогнозного содержания глинистого материала с рекомендуемыми участками постановки буровых работ представлен на рисунке 3.5.

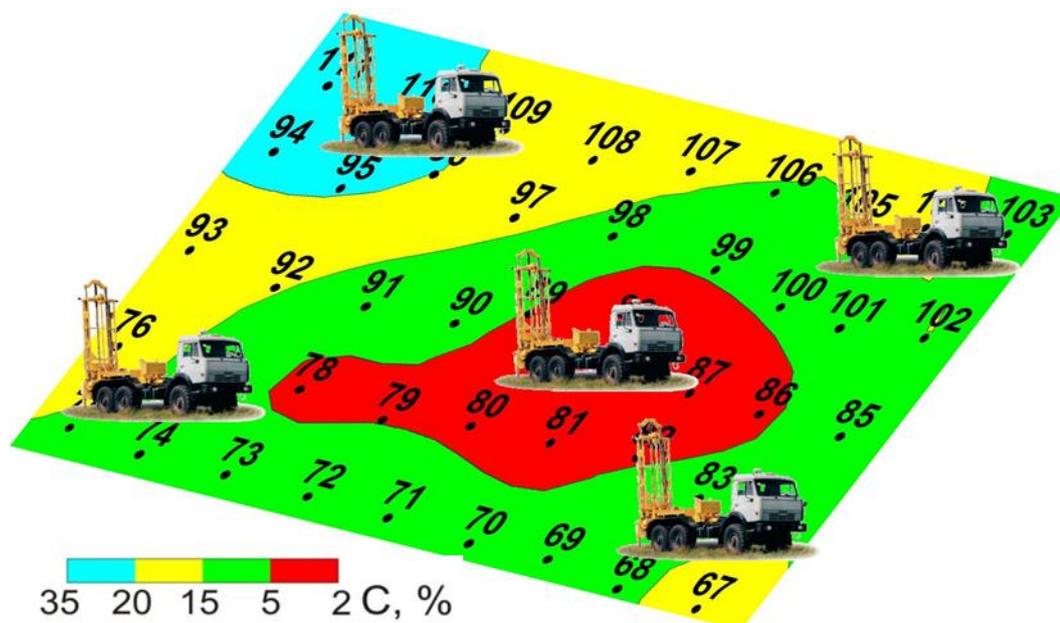


Рис. 3.5 Карта прогнозного содержания глинистого материала (С, %) в интервале глубин 5-10 м одного из перспективных участков Протозановского месторождения

По итогам бурения получены данные о литологическом составе грунтов района исследований. В геологическом строении района изысканий (на глубину исследования 10 м) принимают участие современные биогенные отложения ( $bQ_{IV}$ ) и средне-верхнечетвертичные озерно-аллювиальные отложения ( $laQ_{II-III}$ ).

Сводный геолого-литологический разрез следующий (сверху вниз):

Четвертичная система  $Q$

Современные отложения ( $Q_{IV}$ )

Почвенно-растительный слой ( $pQ_{IV}$ ), встречен повсеместно, мощность 0,2–0,5 м.

Биогенные отложения ( $bQ_{IV}$ )

Торф темно-коричневый нормальнозольный, сильноразложившийся, насыщенный водой, с остатками древесины, мощностью до 1,4–2,8 м.

Средне-верхнечетвертичные отложения ( $Q_{II-III}$ )

Озерно-аллювиальные отложения ( $laQ_{II-III}$ )

Глина легкая пылеватая серовато-коричневая, серая текучепластичная, текучая, реже мягкопластичная, с примесью органических веществ. Глина встречена повсеместно, с поверхности под почвенно-растительным слоем или отложениями торфа. Мощность глины 7,2–9,8 м.

В глинистой толще могут встречаться прослои суглинка мягко- или текучепластичного, реже, супеси и мелко/среднезернистого песка от средней до полной степени водонасыщения с включениями гравийно-галечникового материала. Мощность прослоев не превышает первых метров.

Пример литологической колонки и результатов бурения одной из скважин представлены на рисунках 3.6, 3.7.

№ слоя / n	Геологический индекс	Глубина залегания слоя, м		Мощность, м	Литологический разрез	Место отбора образцов	Наименование грунта	Сведения о воде	
		от	до					глубина появления под з.вод	уровень установив. уровень под з.вод
1	pQiv	0.00	0.30	0.30			Почвенно-растительный слой с корнями деревьев	0.3	0.3
2	bQiv	0.30	1.60	1.30		▲	Торф темно-коричневый мохово-травянистый сильноразложившийся нас. водой		
3	laQII-III	1.60	2.40	0.80		▲	Суглинок легкий пылеватый серый текучепластичный		
4	laQII-III	2.40	4.80	2.40		4	Глина легкая пылеватая серая мягкопластичная с примесью органических веществ		
						6			
5	laQII-III	4.80	10.00	5.20		8	Глина легкая пылеватая серая тугопластичная с примесью органических веществ		
						10			

Рис. 3.6 Литологическая колонка скважины № 9 одного из перспективных участков Протозановского месторождения



Рис. 3.7 Результаты бурения скважины № 9 одного из перспективных участков Протозановского месторождения

Результаты геофизических исследований позволили уточнить гидрогеологические условия район работ. Гидрогеологические условия района характеризуются развитием подземных вод озерно-аллювиальных отложений и почвенно-растительного слоя.

Поверхностные воды на момент исследований (апрель 2012 г.) встречены повсеместно практически с поверхности.

Питание подземных вод происходит в основном за счёт таяния снега и инфильтрации атмосферных осадков. Разгрузка подземных вод происходит в реку Демьянку и ее более мелкие притоки.

По характеру подтопления территория согласно СП [73] относится к подтопленной.

По описываемой в главе 2 методике выполнены лабораторные измерения УЭС проб подземных вод. Выявлено, что подземные воды района работ являются пресными, минерализация изменяется в пределах от 0,2 до 0,6 г/л.

Согласно химическому анализу по своему составу подземные воды гидрокарбонатно-натриево-кальциевые и обладают слабой выщелачивающей, слабой углекислотной и средней общекислотной агрессивностью по отношению к бетону нормальной проницаемости (марки W4). Согласно нормативным документам воды неагрессивны к арматуре железобетонных конструкций при периодическом смачивании.

Из негативных процессов в районе исследований широко развиты процессы подтопления и заболачивания.

Таким образом результаты первичной количественной интерпретации ВЭЗ хорошо согласуются с геологическим строением района работ.

Информация, полученная по результатам бурения, позволила уточнить геоэлектрическую модель среды. С помощью проведения параметрических зондирований выполнена привязка геоэлектрических горизонтов к выделенным инженерно-геологическим элементам, более точно определено удельное сопротивление отложений (рис. 3.8, 3.9).

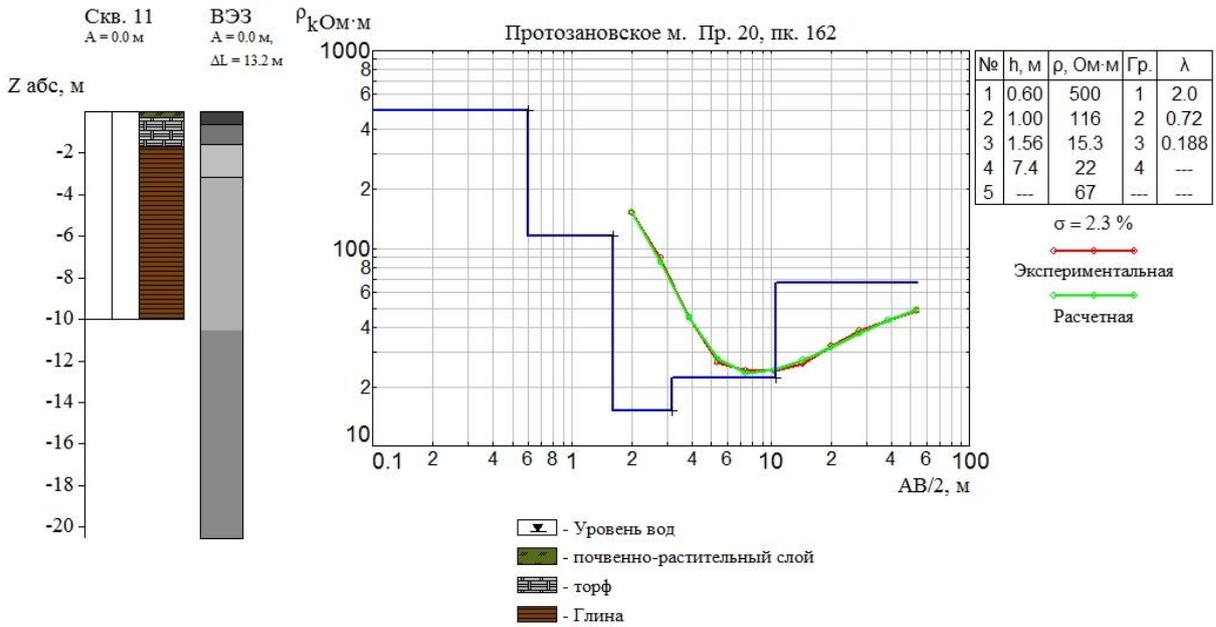


Рис. 3.8 Пример результатов количественной интерпретации параметрического ВЭЗ вблизи скважины № 11 одного из перспективных участков Протозановского месторождения

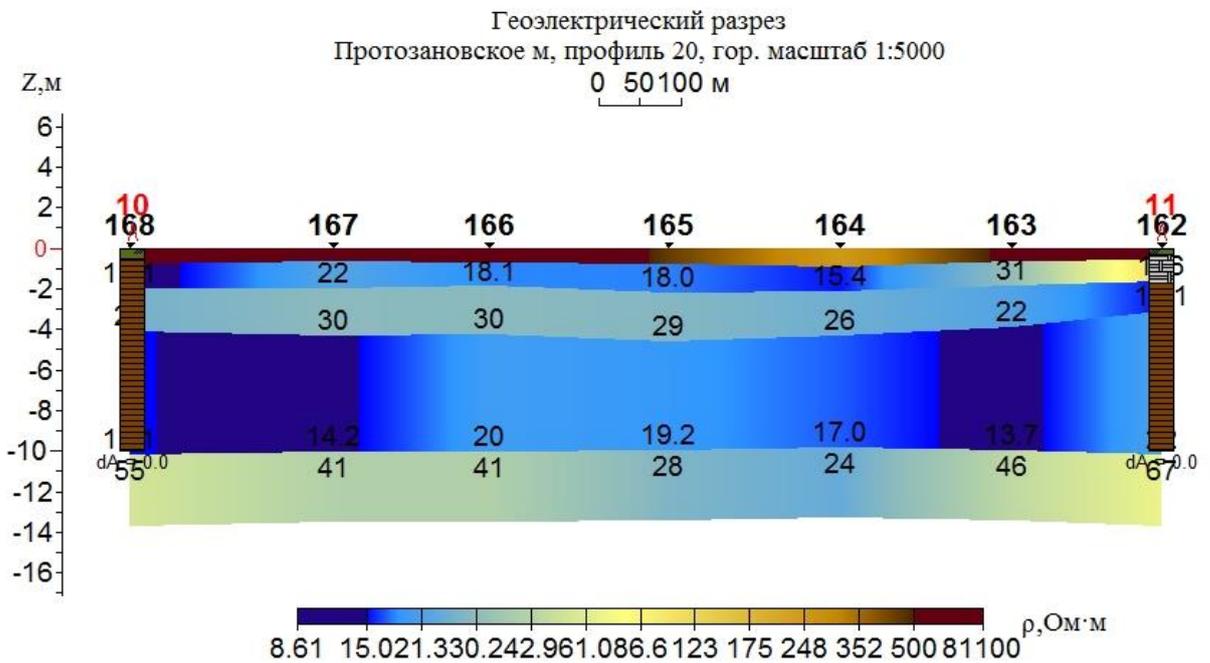


Рис. 3.9 Геоэлектрический разрез по профилю 20, построенный по результатам количественной интерпретации с учетом данных бурения скважин на одном из перспективных участков Протозановского месторождения

Для уточнения зависимости удельного сопротивления грунтов от их литологического состава (процентного содержания глинистого материала) проведены лабораторные измерения УЭС образцов горных пород. Существующая методика измерения УЭС образцов, описанная в нормативных документах, является трудоемкой. Для проведения наблюдений по данной методике необходима подготовка образцов, что увеличивает трудозатраты. Лабораторные измерения удельного сопротивления образцов выполнены по защищаемой автором методике с применением микроустановки Шлюмберже, описанной в главе 2 настоящей работы.

В результате построены диаграммы распределения УЭС дисперсных грунтов для каждого месторождения. Распределения изменения удельного сопротивления для каждой группы дисперсных грунтов семи нефтяных месторождений показано на примере Протозановского месторождения (рис. 3.10).

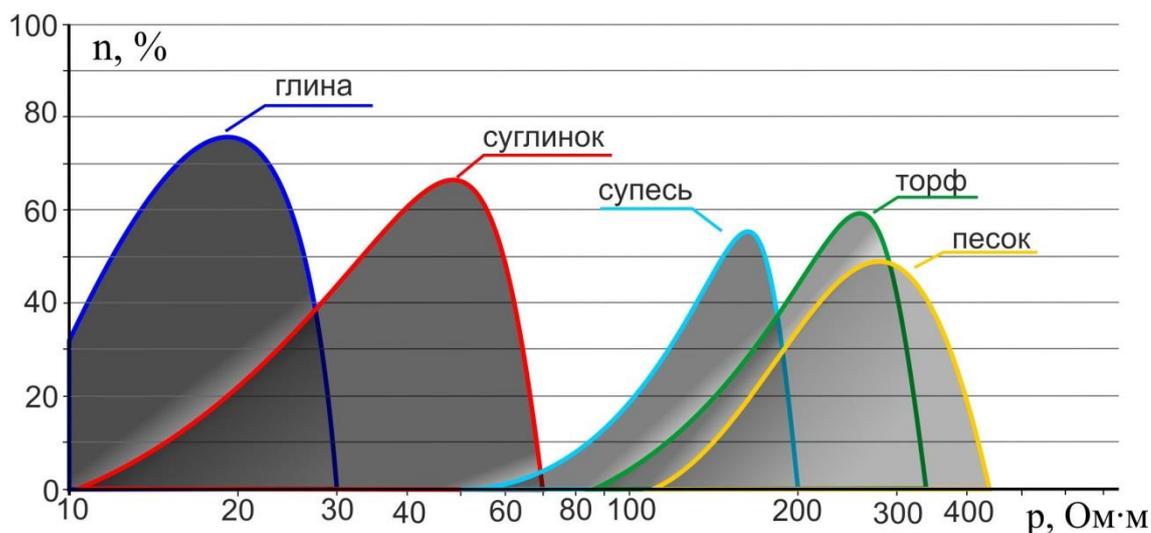


Рис. 3.10 Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов Протозановского месторождения ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ )

Из рисунка видно, что для большинства глин характерны сопротивления 18–19 Ом·м, суглинков – 45–50 Ом·м, супесей – 150–160 Ом·м, песков – 220–320 Ом·м, биогенные отложения торфа в большинстве своем характеризуются сопротивлениями 220–250 Ом·м. Отмеченные наиболее часто встречаемые

значения сопротивлений глин и суглинков согласуются с данными зависимости, рассчитанной В.А. Шевниным для условий  $EKO=1,5$  г/л (рис. 3.4). Отложения супеси и песка характеризуются более высокими значениями сопротивлений. Измерения на образцах проводились в условиях, близких к естественной влажности. Завышение УЭС грунтов связано, главным образом, с неполной степенью водонасыщения отложений, а также наличием примесей органических веществ, включений обломочного материала, что необходимо учитывать при оценке перспективности.

На основании полученной зависимости с учетом граничных значений сопротивлений различных литологических разностей были построены окончательные интервальные карты процентного содержания глинистого материала для всех перспективных участков. Кроме того, была определена балльность, используемая для инженерно-геологического районирования [71].

На рисунке 3.11 представлен пример для одного из перспективных участков Протозановского нефтяного месторождения.

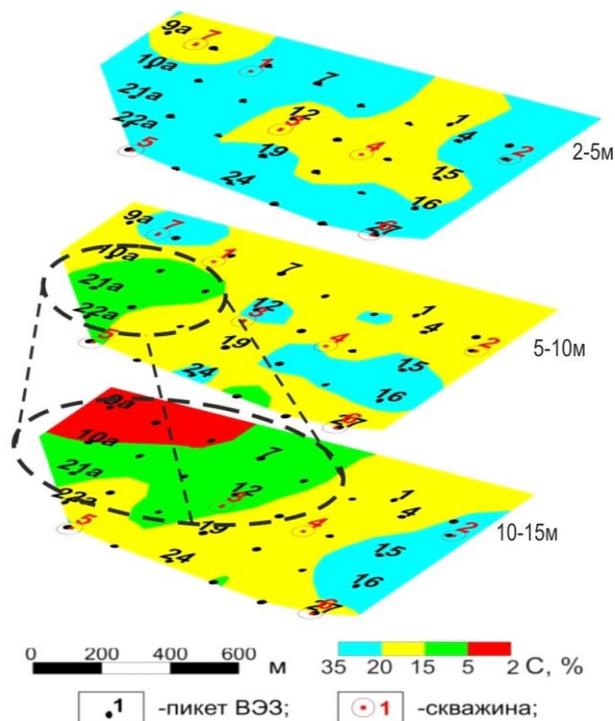


Рис. 3.11 Окончательные карты процентного содержания глинистого материала в интервале глубин 2-5 м, 5-10 м, 10-15 м для одного из перспективных участков Протозановского месторождения

Выявлено, что для большей части исследуемой территории характерно содержание глинистого материала от 15 до 35 %, что соответствует по гранулометрической классификации грунтов глинам и суглинкам. Супеси (принято содержание глинистого материала от 5 до 15 %) распространены локально с глубины около 5 м, пески – грунты с содержанием глины менее 5 % – имеют очень малый объем (около 2,5%) и залегают на глубине, зачастую, более 10 м.

Следует также учитывать, что сопротивление геоэлектрических горизонтов является интегральной характеристикой для выделенного интервала глубин и может быть завышено из-за отдельно не выделяемых прослоев (включений) песка, гравия и органических остатков торфа.

Данные анализа карт использованы для подсчета объемов грунтов с различным содержанием глины на каждом перспективном участке, а также определен объем торфяных залежей. Данные объемов различных грунтов показаны на примере одного из перспективных участков Протозановского месторождения (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Объемы грунтов с различным содержанием глин (на примере одного из перспективных участков Протозановского месторождения)

Геоэлектрический горизонт, глубина залегания	Объем пород с соответствующим процентным содержанием глин, тысяч м <sup>3</sup>			
	35-20%	20-15%	15-5%	5-2%
1 слой, 0-0.9м	Объем торфа V=2400			
2 слой, 0.9-2.4м				
3 слой, 2.4-5м	1874	729	-	-
4 слой 5-10м	1490	2234	931	-
5 слой, 10-15м	570	3230	1330	380
Итого:	3934	6193	2261	380

Площадь участка 1 км<sup>2</sup>, исследованный объем пород 15 млн. м<sup>3</sup>.

Подобный цикл работ, в соответствии с методикой, описанной в главе 3.2 данной работы, выполнен на каждом перспективном участке в зонах поиска радиусом 5, 10, 15 и 20 км вокруг семи нефтяных месторождений (рис. 3.12): Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского. Полученная информация передана Недропользователю для определения перспективности использования встреченных грунтов в качестве различных строительных материалов и проектирования обустройства.

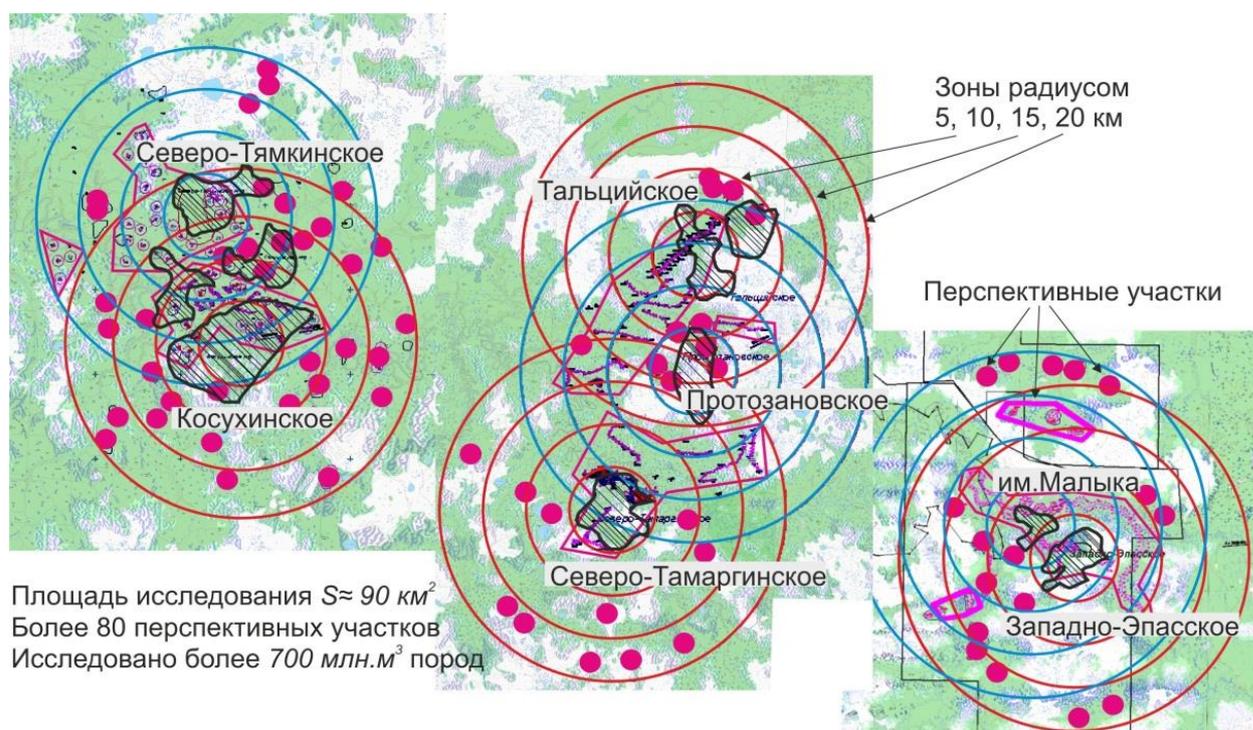


Рис. 3.12 Схема расположения перспективных участков вокруг нефтяных месторождений

### 3.4 Выводы к главе 3

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.

2. Благодаря стадийности проведения инженерно-геологических изысканий и выполнению геофизических исследований по методике, описанной в главе 3.2, удалось сократить объемы бурения вдвое.

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

4. По итогам исследований проведена оценка перспективности более 80 участков для использования 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.

5. Кроме поисковых задач с помощью методов электротомии уточнены инженерно-геологические и гидрогеологические условия района работ, информация о которых использована при проектировании и обустройстве месторождений.

Совокупность изложенных результатов подтверждает практическую значимость второго защищаемого положения. Материалы исследований представлены в публикациях [4, 8, 10, 14]. Учитывая положительный опыт данных инженерно-геофизических исследований на перечисленных выше объектах изысканий в рамках производственной деятельности предприятия ООО НИПППД «Недра», второе защищаемое положение считаю доказанным.

## ГЛАВА 4

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

В главе 4 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»* [2, 3, 5, 9, 12, 13].

На этапе эксплуатации, реконструкции, ликвидации зданий и сооружений зачастую возникают вопросы, связанные с определением геометрических характеристик конструкции заглубленной части фундаментов, а также их действительного технического состояния. Совокупность этих технических факторов и особенностей геологического строения грунтового основания, в первую очередь, влияет на безопасность эксплуатации сооружений.

При определении геотехнических условий практическая реализация осложняется ограничением количества вскрытий конструкций фундаментов (шурфов) или полным отсутствием возможности их выполнения. Подобные ситуации особенно часто могут возникать при проведении обследований фундаментов действующих предприятий и промышленных площадок.

В условиях, когда исследование прямыми методами затруднено или невозможно, определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений может проводиться с помощью геофизических методов исследований.

#### 4.1 Анализ геофизических методов исследований величины заглубленной части фундаментов

В настоящее время существуют сейсмоакустические (В.В. Капустин, 2009) [44], электромагнитные геофизические методы, позволяющие получать информацию о характеристиках фундаментов. Измерения проводятся как в наземном, так и в скважинном или комбинированном вариантах.

Вертикальная свая является наиболее простым примером конструкции заглубленной части фундамента. Для решения задачи определения длины сваи преимущественно используются способы, основанные на применении волновых методов. Проводимые наблюдения заключаются в изучении распространения акустических или электромагнитных колебаний в системе «свая – грунт».

В настоящее время в практике инженерных работ применяются следующие способы определения длины свай (рис. 4.1):

- возбуждение и регистрация на поверхности сваи акустических, электромагнитных волн (рис. 4.1, а);
- возбуждение акустических, электромагнитных волн на поверхности сваи и регистрация проходящих волн в параллельно пробуренной скважине (рис. 4.1, б);
- возбуждение и регистрация «направляемых» акустических, электромагнитных волн в параллельно пробуренной скважине (рис. 4.1, в).

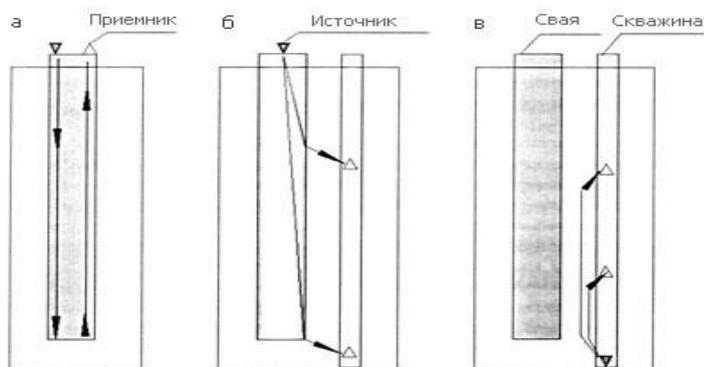


Рис. 4.1 Основные схемы измерений: а) – поверхностный, б) – измерения свая-скважина (параллельный), в) – метод, основанный на наблюдении в скважине «направляемых» волн

### 4.1.1 Акустические методы

Способ, основанный на возбуждении и регистрации акустических волн на поверхности сваи. Может применяться не только для определения длины сваи, но и для оценки прочностных характеристик сваи, наличия дефектов и т.п. Применение данного способа для определения длины сваи имеет целый ряд ограничений: скорость в свае предполагается постоянной и заранее известной; свая должна иметь постоянное сечение; свая должна иметь относительно малое излучение во вмещающий грунт; вмещающий грунт должен иметь достаточно однородное строение.

При соблюдении указанных требований длина сваи определяется по известной зависимости:

$$h = \frac{V \cdot \Delta t}{2}, \quad (4.1)$$

где  $V = \sqrt{\frac{E}{\sigma}}$  – стержневая скорость продольной волны в свае ( $\sigma$  – плотность материала сваи,  $E$  – модуль Юнга);  $\Delta t$  – интервальное время пробега отражённой от конца сваи волны.

В случае, когда свая имеет сильно выраженные волноводные свойства ( $\sigma_{\text{св}} V_{\text{св}} \gg \sigma_{\text{грунт}} V_{\text{грунт}}$ ), для определения длины сваи могут использоваться спектральные характеристики сигнала в свае. Когда известна скорость в бетоне, полученная, например, в результате ультразвуковых измерений, можно оценить глубину сваи, определяя частоты резонансных максимумов низших мод. Из теории распространения продольных волн в тонких стержнях известно, что интервал следования резонансных максимумов примерно определяется следующим выражением:

$$f(n) = \frac{V_{\text{стерж}} \cdot n}{2l}, \quad (4.2)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $l$  – длина сваи.

Максимумы, располагающиеся вне данной последовательности, могут быть обусловлены отражениями от неоднородностей в теле сваи или вблизи

нее. В тех ситуациях, когда отражённый от конца сваи сигнал надёжно не определяется, может быть использован второй способ – возбуждение акустических волн на поверхности сваи и регистрация проходящих волн в параллельно пробуренной скважине (рис. 4.2).

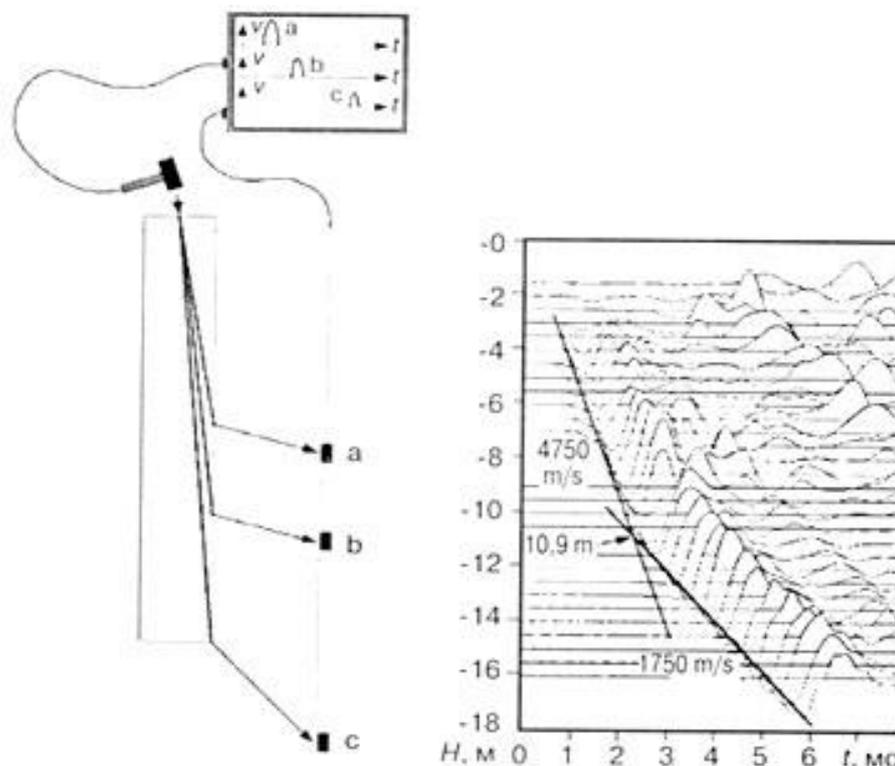


Рис. 4.2 Определение длины сваи параллельным методом

Проходящая волна, возбуждаемая в оголовке сваи, регистрируется в скважине в первых вступлениях. Положение точек на годографе первых вступлений может быть определено из выражений:

$$t_a = \frac{S_1}{V_1} + \frac{S_2}{V_2}; t_b = \frac{S_3}{V_1} + \frac{S_4}{V_2}, \quad (4.3)$$

где  $S_1, S_3$  – путь, пройденный волной в свае;  $S_2, S_4$  – путь, пройденный волной в грунте;  $V_1$  – скорость волны в свае;  $V_2$  – скорость волны в грунте.

Скорости распространения акустической волны в свае и в грунте могут быть найдены по наклонам годографа первых вступлений. Глубина сваи может быть определена по координатам точки излома годографов. Область применения данного способа также ограничена рядом условий, в частности,

контрастностью акустических жёсткостей сваи и грунта, степенью их однородности, параллельностью оси скважины и оси сваи и т.п.

Следующий способ основан на свойствах волн, распространяющихся вдоль направляющей системы возбуждение и регистрация “направляемых” акустических волн в параллельно пробуренной скважине. “Направляемые” волны, распространяясь вдоль направляющей системы, испытывают отражения от неоднородностей, встречающихся на пути их следования. Для решения задачи по определению длины сваи могут применяться наблюдения гидроволн, распространяющихся вдоль водонаполненной сваи и возбуждаемых электроискровым источником.

В частности, наблюдается отражение от конца сваи гидроволны, распространяющейся вдоль скважины, расположенной параллельно свае (рис. 4.3).

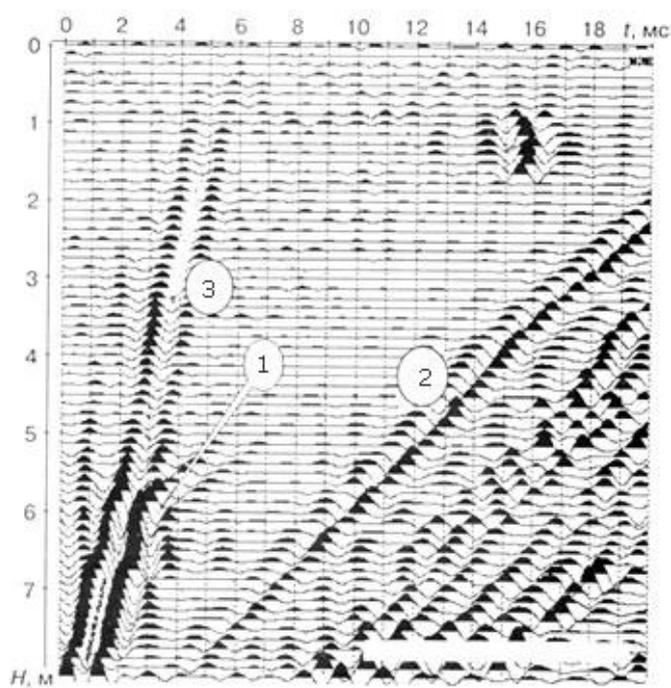


Рис. 4.3 Определение длины сваи с помощью отраженной гидроволны: 1 – гидроволна отраженная от конца сваи; 2 – гидроволна; 3 – объемная волна

Исследования акустическими методами проводятся с использованием узкоспециализированной сейсмоакустической аппаратуры. Среди

отечественных разработок можно отметить аппаратно-программные комплексы типа СПЕКТР-2.0, ИДС-1, которые используют возбуждение упругих колебаний в фундаменте и регистрацию их отражений [44].

При практическом применении акустические методы имеют целый ряд ограничений. В реальных условиях, когда фундамент несет нагрузку, обследование акустическими методами может быть затруднено или невозможно. При исследованиях может возникать сложная волновая картина, которая затрудняет интерпретацию и определение глубины залегания подошвы фундамента. При этом, ввиду недостаточной разрешающей способности, отражения могут возникать не от конца свай, а от границ раздела наземных конструкций, природных или техногенно-уплотненных слоев грунта при формировании фундамента.

#### **4.1.2 Сейсмические методы**

В качестве примера приводится способ сейсмического обследования свайных фундаментов (А.Г. Ярославцев, А.И. Бабкин, И.А. Санфирова) [87].

Согласно заявленному способу, упругие колебания возбуждают вдоль наружных стен здания в грунте без непосредственного доступа к сваям посредством ударного источника малой мощности. Регистрацию их осуществляют сейсмоприемниками, расположенными как на стороне линии возбуждения, так и на противоположной стороне здания (рис. 4.4). Определяют скорости и времена вступления волн, отраженных от геологических границ. Путем сравнительного анализа формы записи на временных разрезах, полученных отдельно по продольным и непродольным профильным линиям, выделяют дифракционные явления, вызванные свайными окончаниями. Определяют времена точек дифракции и их координаты, на основании которых, с учетом значений скоростей распространения упругих колебаний, вычисляют глубины проникновения свай в породы и оценивают их шаг (рис. 4.5).

Технический результат — определение соотношения глубин свайных окончаний и границ основных лито-физических комплексов под эксплуатируемым зданием в пределах всей площади свайного поля без непосредственного доступа к сваям.

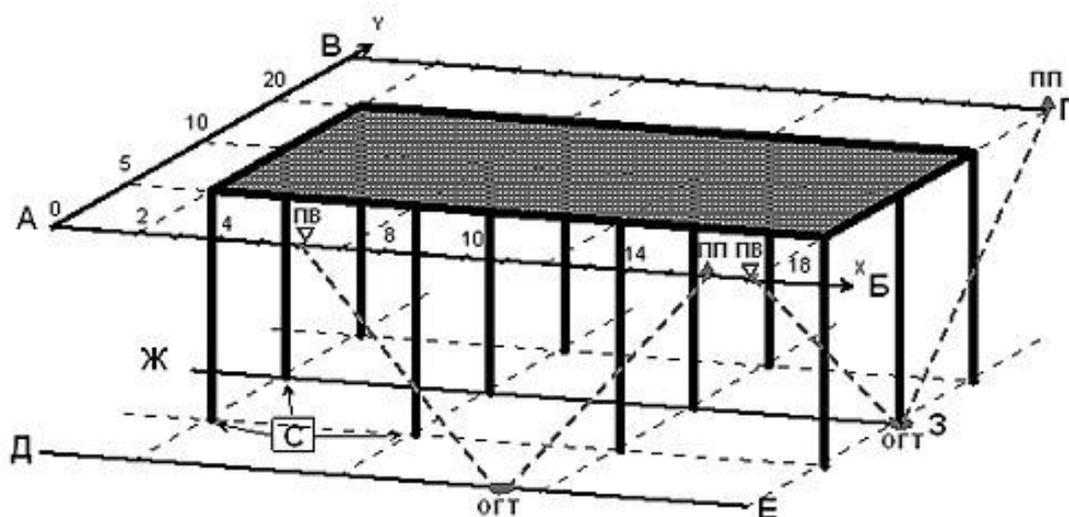


Рис. 4.4 Схема формирования точек отражений в продольном и непродольном вариантах профилирования

Исследования могут быть дополнены контрольными наблюдениями непосредственно на доступных оголовках свай (рис. 4.6). В этом варианте сейсмоприемники закрепляются на теле свай. Возбуждение колебаний производят по оголовку сваи. Скорость упругих колебаний в свае определяют по набегу годографа, получаемого за счет вертикальной расстановки группы сейсмоприемников. По временным отметкам прихода волны, отраженной от границы «свая-грунт», определяют длину всей сваи.

Кроме того, сейсмические исследования в комплексе с методами электрометрии по технологии, описанной в [70, 74] (И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев, Ю.И. Степанов и другие), позволяют изучать строение грунтового основания и особенности элементов конструкции фундамента.

К недостаткам данного метода также можно отнести затруднения или невозможность выполнения контрольных наблюдений при условиях отсутствия доступных оголовков свай и неопределенность интерпретации в условиях сложной волновой картины.

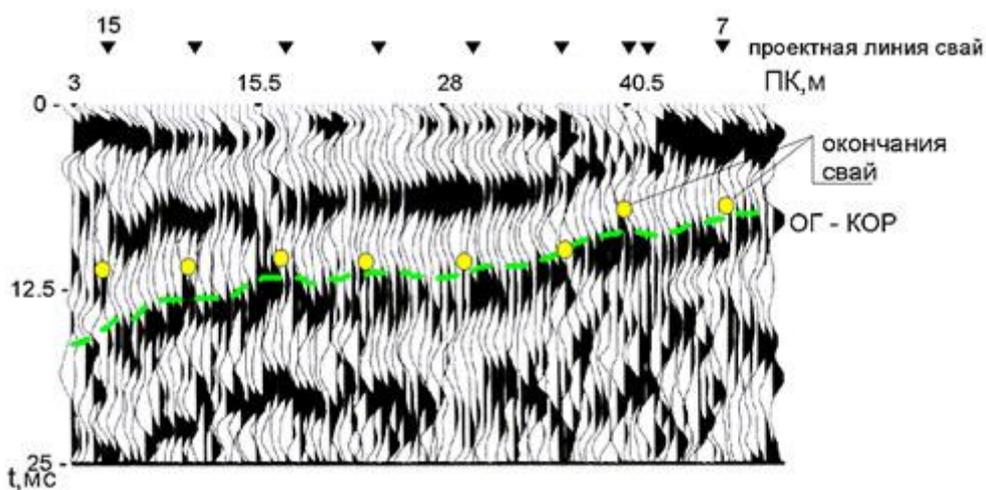


Рис. 4.5 Выделение окончаний свай по точкам дифракции на временном разрезе МОГТ

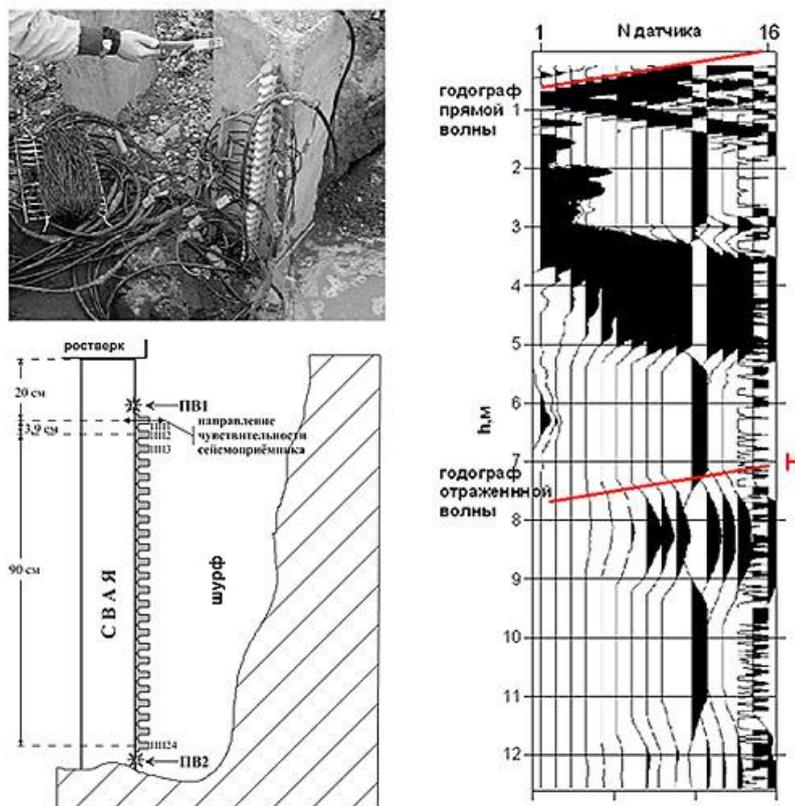


Рис. 4.6 Схема наблюдений и результат сейсмоакустических исследований на оголовке свай

### 4.1.3 Георадиолокация

Существуют примеры применения для определения глубины погружения сваи метода георадиолокации, основанного на возбуждении и регистрации электромагнитных волн мегагерцового диапазона. Исследования могут происходить возбуждением и регистрацией электромагнитных волн на поверхности сваи и грунтового основания или в параллельно пробуренной скважине (В.В. Капустин, В.М. Шувалов).

При прохождении антенны георадара вблизи оголовка сваи, возникают условия образования «направляемой» волны, распространяющейся вдоль сваи (рис. 4.7, а). При проведении георадарных наблюдений в параллельно пробуренной скважине, длина сваи определяется по наблюдению отражений от сваи и дифракции на ее конце (рис. 4.7, б).

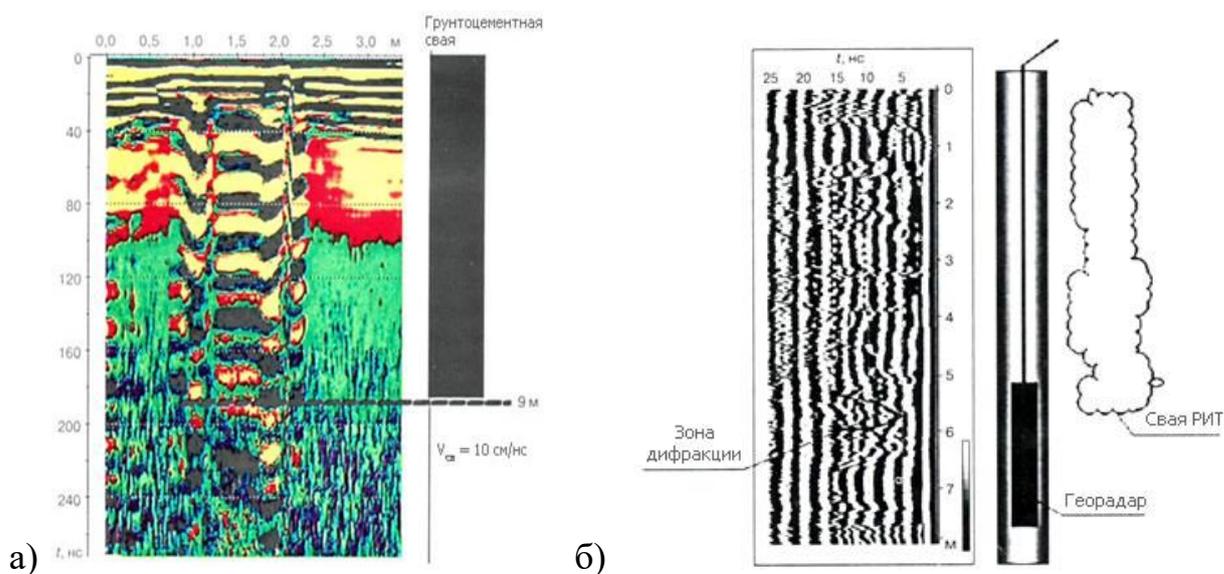


Рис. 4.7 Определение длины сваи с помощью георадара [44]  
 а) – радарограмма при прохождении антенны вблизи грунтоцементной сваи,  
 б) – результаты скважинных исследований

К недостаткам метода можно отнести наличие сложной волновой картины, сильное затухание сигнала в обводненных и глинистых грунтах, характерных для территории Пермского края (рис. 4.8) [74, 81]. Интерпретация материалов, к сожалению, пока недостаточно отработана, и данный способ довольно редко применяется на практике.

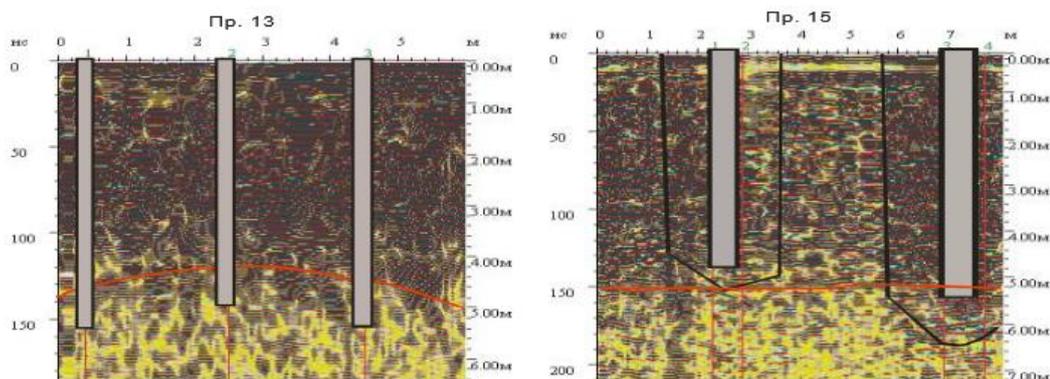


Рис. 4.8 Георадиолокационный разрез при забивке свай [81]

#### 4.1.4 Метод Квятковского

Способ геоэлектроразведки, заключающийся в пропускании в землю электрического тока и определении параметров геоэлектрического разреза по результатам интерпретации измерений [45]. Отличается тем, что, с целью обеспечения глубины заложения фундаментов зданий и сооружений, фундамент подключают к источнику постоянного тока. Измеряется переходное сопротивление заземленной части фундамента, затем измеряется удельное электрическое сопротивление окружающего фундамент грунта, одновременно определяют периметр фундамента у поверхности земли и рассчитывают комплексный электрометрический параметр  $L$  по формуле:

$$L = \frac{\rho}{P \cdot R'} \quad (4.4)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление окружающего фундамент грунта;  $P$  – периметр фундамента;  $R'$  – переходное сопротивление заземленной части фундамента. Определяют переводной коэффициент  $X$  путем установления взаимосвязи между геоэлектрическими и геометрическими параметрами фундамента по теоретически рассчитанной зависимости  $L = f(X)$ :

$$L = \frac{2\pi}{K(m) \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{[1 - (1 - x^2 k^2(m))t^2][1 + (m^2 - 1)t^2]}}}, \quad (4.5)$$

где  $K(m)$  – эллиптический интеграл II рода;  $X = \frac{a}{P}$ ;  $P = bK(m)$ ;  $m = \frac{c}{B} \cong 1$ ;  $a, b, c$  – размеры полуосей полуэллипсоида;  $t$  – переменная интегрирования. После этого определяют глубину заложения фундамента  $h$  по формуле:

$$h = P \cdot X. \quad (4.6)$$

Однако, по словам самого Г.И. Квятковского, оценка глубины заземлённой части фундаментов по материалам наземных электроразведочных исследований затруднена. Ток с фундамента-заземлителя может стекать неравномерно, искажения вносят нарушения фундамента, наличие гидроизоляции и т.д. Кроме того, в городских условиях проведение измерений и определение сопротивления грунтов существенно затрудняет асфальтобетонное покрытие.

#### 4.1.5 Токовый каротаж и Mise-a-la-masse метод

Суть методов заключается в подключении одного питающего электрода к арматуре сваи, измерении в параллельной скважине плотности тока, потенциала, градиента потенциала, анализе данных параметров или расчете кривой кажущегося сопротивления.

В методе токового каротажа вблизи оголовка сваи (Ю.Ю. Васильев, Н.М. Цыпченко, 2009) происходит увеличение плотности тока, на графике кажущегося сопротивления наблюдается увеличение сопротивления грунтов за счет их уплотнения (рис. 4.9) [23].

По результатам Mise-a-la-masse метода (Dong P., Fan J. et al) там, где заканчивается армирование сваи, наблюдается резкое уменьшение потенциала и минимум градиента потенциала (рис. 4.10) [89].

Недостатками представленных методов является невозможность обследования несущих нагрузку фундаментов, ограниченность применения в городских условиях, необходимость контакта с арматурой сваи и армирования на всю ее глубину, неравномерное стекание тока с заземлителя, сложность интерпретации результатов, дороговизна оборудования.

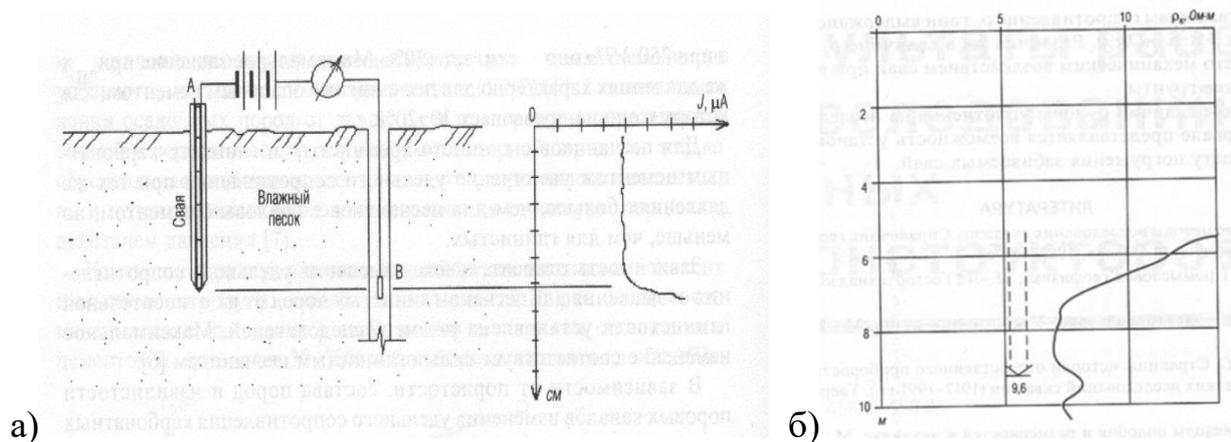


Рис. 4.9 Определение длины сваи с помощью токового каротажа: а) – физическое моделирование, б) – результаты опробывания

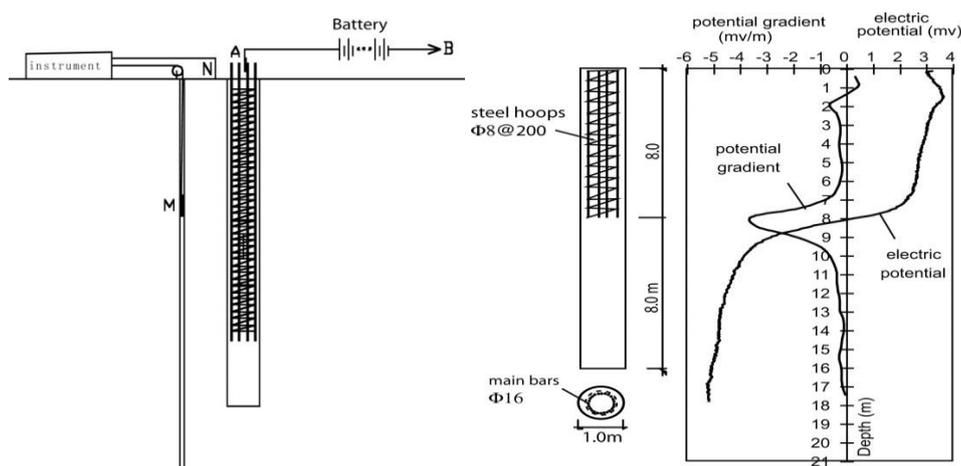


Рис. 4.10 Исследование сваи методом заряда (Mise-a-la-masse метод)

В работе С.М. Простова [63] выделяется группа методов каротажа сопротивлений и индукционный каротаж в параллельной скважине. При доказанной работоспособности, описанные методики также подвержены влиянию обозначенных ограничений.

#### 4.1.6 Метод сопротивлений в параллельной скважине

В соавторстве с А.В. Татаркиным и К.В. Голубевым [5] предложен способ определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений, основанный на применении электрического каротажа. Измерения проводятся на постоянном токе в параллельно пробуренной скважине (рис. 4.11).

Предложенный способ лишен вышеописанных недостатков и обладает рядом преимуществ: большой чувствительностью, высоким уровнем сигнала, дает возможность обследовать действующие предприятия, не требует дорогостоящего оборудования, в процессе бурения дает информацию о строении грунтового основания.

Основным отличием предлагаемого способа от описанных С.М. Простовым [63] является то, что необходимость подключения питающих электродов на исследуемую сваю не требуется.

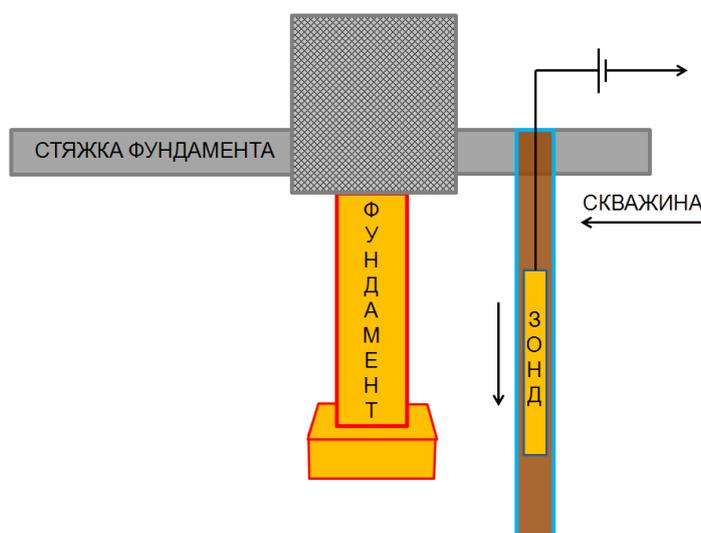


Рис. 4.11 Схема проведения измерений методом сопротивлений в параллельной скважине

Теоретическое обоснование методики полевых работ и определение интерпретационных критериев выполнено по результатам моделирования.

## 4.2 Трехмерное моделирование

### 4.2.1 Численное моделирование

На первом этапе, для определения принципиальных возможностей использования метода сопротивлений в параллельной скважине при решении рассматриваемой задачи, в программе ZondRes3D [43] проведено численное моделирование.

Выполнены расчеты трехмерных моделей с различными предполагаемыми конструкциями фундаментов и строением вмещающей среды. В качестве измерительной выбрана трехэлектродная установка АЗ.0М1.0N. Выбор трехэлектродной установки обусловлен тем, что при проведении измерений в скважине – в условиях ограниченного пространства – она обладает необходимой детальностью и наибольшей глубиной исследования.

Результаты расчетов некоторых моделей для однородной среды с использованием трехэлектродной установки представлены на рисунке 4.12.

При решении данной геотехнической задачи в основе геоэлектрической модели среды лежит модель контакта двух сред с разным сопротивлением, перекрытого толщей вмещающих грунтов.

Результаты численного моделирования показывают принципиальные возможности применения метода сопротивлений в скважинном варианте для определения геометрических характеристик заглубленной части фундаментов зданий и сооружений. Над нижним концом сваи наблюдается локальный максимум графика кажущихся сопротивлений.

Кроме определения величины погружения фундамента, в средах, близких по строению к однородным, согласно результатам численного моделирования, возможно определение состояния и геометрических особенностей его конструкций.

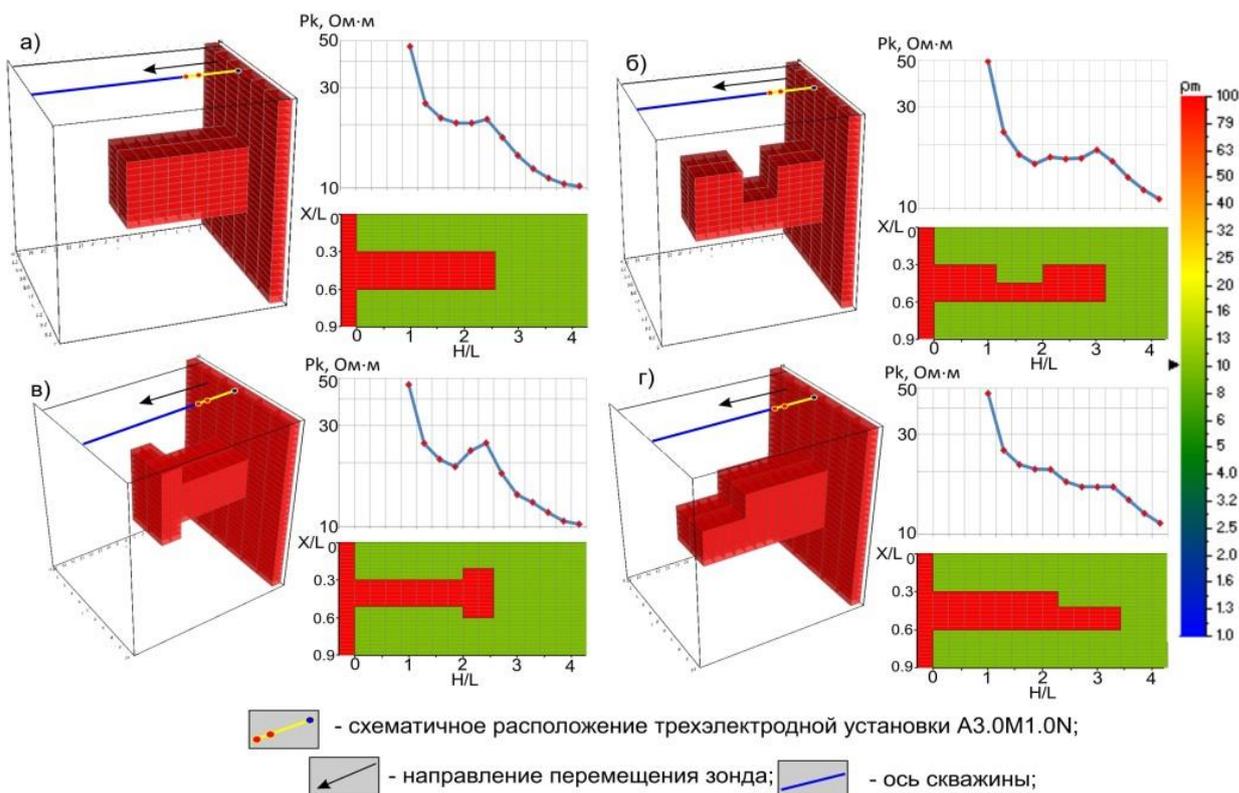


Рис. 4.12 Результаты численного моделирования аномальных эффектов для свайного фундамента с учетом верхнего полупространства и свай различных конструкций: а) – одиночная свая, б) – свая с нарушением, в) и г) – сваи различных конструкций (Н – глубина точки записи, Х – расстояние от оси скважины, L – длина зонда)

Для заверки и более точного обоснования интерпретационных критериев на следующем этапе исследований проведено физическое моделирование электрических полей.

#### 4.2.2 Физическое моделирование

На этапе физического моделирования была проведена серия экспериментов по изучению характера поля постоянного электрического тока для условий нахождения одиночной сваи в однородной и двухслойной средах.

*Моделирование в условиях однородной среды.*

Измерения для условий однородной среды выполнены с использованием трехэлектродной установки АЗ.0М1.0N (размеры в сантиметрах). В качестве модели сваи выступал пластиковый брусок, длина погруженной части, ширина и высота которого имели соотношение  $6,5 \times 2 \times 1$  см. Рассматриваемая ситуация аналогична модели, изображенной на рисунке 4.12, а. Удельное электрическое сопротивление вмещающей среды составляло  $12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Измерения проводились на различных удалениях от объекта исследования, результаты эксперимента представлены на рисунке 4.13.

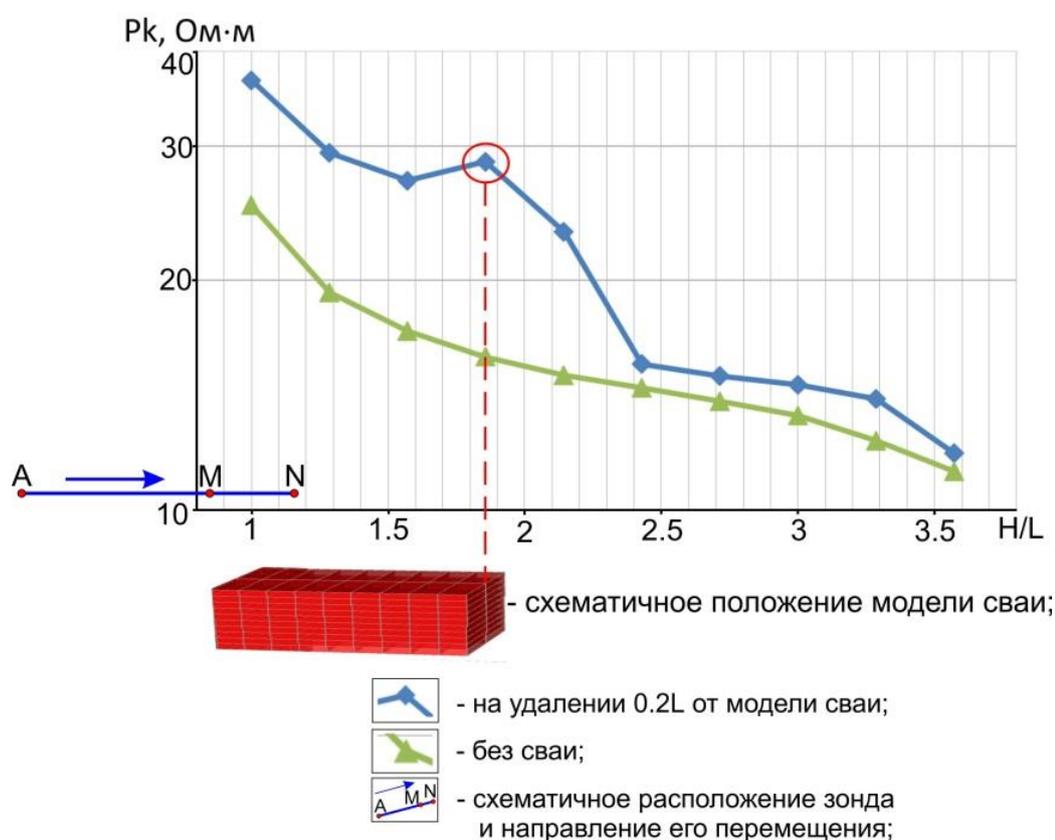


Рис. 4.13 Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам физического моделирования аномального эффекта от одиночной сваи ( $H$  – глубина точки записи,  $L$  – длина зонда)

Согласно рисунку 4.13, аномальный эффект от погруженного конца сваи на графике кажущегося сопротивления представлен характерным максимумом. Величина аномального эффект 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 на расстояние большем или равном длине зонда аномальный эффект уменьшается, однако в случае объектов по ширине, превышающей длину зонда, чувствительность остается достаточной и на расстоянии  $L$ .

Для более точного определения геометрических характеристик конструкции фундаментов и их действительного технического состояния могут быть использованы одновременные измерения с зондами разной величины (рис. 4.22) [5]. Большой зонд обладает большим аномальным эффектом, малый зонд быстрее выходит на сопротивление среды, что дает возможность получать информацию как о характеристиках грунтового основания, так и о состоянии фундамента (А.В. Татаркин, 2019) [75].

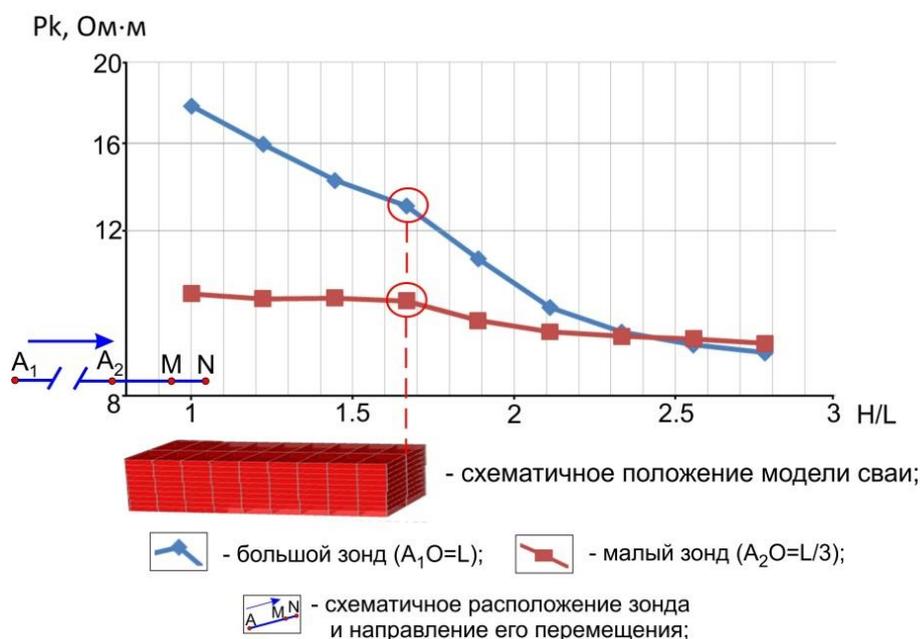


Рис. 4.14 Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам физического моделирования при одновременном измерении КС зондами различной длины на удалении  $0,3 \cdot L$  от объекта исследования

Таким образом, результаты физического моделирования подтверждают целесообразность применения трехэлектродной установки для определения глубины погружения фундамента. Предлагаемая методика исследования обладает высокой чувствительностью, ключевым критерием интерпретации является характерный, имеющий соответствующую величину аномального эффекта, максимум графика кажущихся сопротивлений.

Далее на этапе физического моделирования были проведены исследования для более сложных геотехнических условий.

#### *Моделирование в условиях двухслойной среды.*

Актуальность исследований связана с тем, что в реальных условиях грунтовое основание может иметь более сложное слоистое строение. В данном случае стоит подразумевать переслаивание пластов с различным удельным электрическим сопротивлением, которое может быть обусловлено как различием литологического состава, так и степенью водонасыщения. В слоистых средах с определением положения заглубленной части фундамента могут возникать различные вопросы. Они связаны с наличием экстремумов, обусловленных влиянием строения геологической среды, особенно если соотношение электрических свойств различных слоев таковы, что отклик от них сравним с полезным сигналом или больше его.

Целью моделирования в двухслойной среде являлось определение интерпретационных критериев, позволяющих отделить отклик от конца заглубленной части фундамента от сигнала, связанного с геологической границей.

Объектом исследования также выбрана одиночная свая, как элемент конструкции заглубленной части свайного фундамента. Моделью сваи являлся пластиковый брусок размерами 11×3×3 см. В качестве вмещающей была использована контрастная двухслойная среда, как наиболее простой и, в то же время, однозначный вариант. Первый слой был представлен песком и обладал относительно повышенным электрическим сопротивлением, второй слой представлен глинистым грунтом с меньшим сопротивлением (рис. 4.15).



Рис. 4.15 Физическое моделирование в двухслойной среде

Наблюдения выполнялись в баке для моделирования, свая располагалась горизонтально на контакте двух сред, измерения проводились на поверхности среды, а не в скважинном варианте. Такой подход обусловлен простотой построения модели и реализации наблюдений в процессе исследований.

Изучались два случая нахождения сваи в двухслойной среде: геологическая граница находилась посередине заглубленной части сваи и положение конца сваи совпадало с геологической границей. Изучаемые геотехнические условия и их модели представлены на рисунке 4.16.

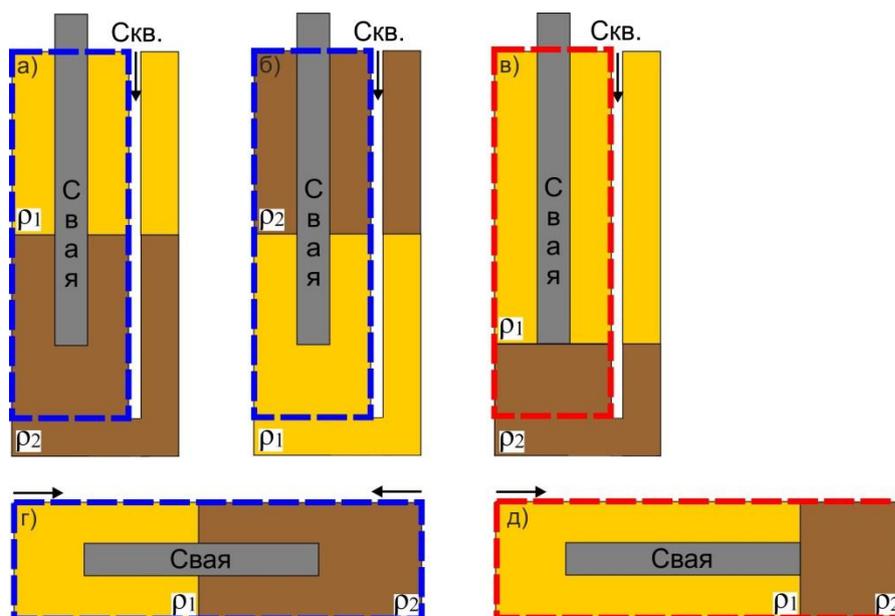


Рис. 4.16 Изучаемые геотехнические условия в двухслойной геологической среде ( $\rho_1 > \rho_2$ ): а), б) – при положении границы слоев посередине сваи, в) – при положении геологической границы на глубине погружения сваи, г), д) – соответствующие им модели

Стрелкой показано направление измерений

Горизонтально расположенная свая в построенных моделях (рис. 4.16, г, д) эквивалентна участку погруженной части вертикально расположенной сваи фундамента. Данные модельные примеры не учитывают влияние верхнего полупространства (границы раздела земля-воздух). Но они позволяют оптимизировать процесс наблюдений: одновременно изучать отклик от концов сваи в различных средах без изменения условий ее погружения, контролировать расположение измерительной установки и качества заземления, минимизировать изменение свойств грунтов и их сплошности.

Наблюдения методом сопротивлений были выполнены на квазипостоянном токе в модификации комбинированного электропрофилирования (КЭП) установками А3.2М0.8N и М0.8N3.2В (размеры в сантиметрах) и в модификации трехразносного электропрофилирования (ЭП) установкой МNВ с разносами  $R=2,1; 3,9; 5,7$  см.

Величина приемной линии MN составляла 0,8 см. Выбор трехэлектродных установок обусловлен тем, что в данных условиях ограниченного пространства они обладают высокой чувствительностью, оптимальной детальностью и наибольшей глубиной исследования. Разносы установок определялись глубиной исследования и размерами использованных радиодеталей, с помощью которых выполнены многоэлектродные измерения. Для трехразносного ЭП размер установок выбран таким образом, чтобы первый (самый малый) разнос характеризовал свойства только геологического разреза, а третий (наибольший) разнос – давал полезный сигнал необходимой амплитуды от конца сваи. Наблюдения выполнены сначала в среде без сваи для измерения фона, затем в среде со свайей.

По результатам наблюдений строились графики электропрофилирования и их трансформанты: графики разности и отношения значений кажущегося сопротивления на соответствующих разносах, графики производных, разрезы КС и удельного сопротивления. По горизонтальной оси откладывались значения отношений положения точки записи X к величине длины измерительной установки L. Анализ результатов наблюдений показывает, что все полученные графики профилирования в первом приближении эквивалентны теоретическим графикам ЭП над контактом двух сред при измерении на поверхности (Б.К. Матвеев, 1990) [55].

В первом, более простом случае, когда геологическая граница находится посередине заглубленной части сваи, на фоне такого графика электропрофилирования, максимумами выделяются участки, связанные с ее концами (рис. 4.17). То есть, в подобных условиях достаточным является проведение скважинных измерений с использованием трехэлектродного зонда AMN или MNB.

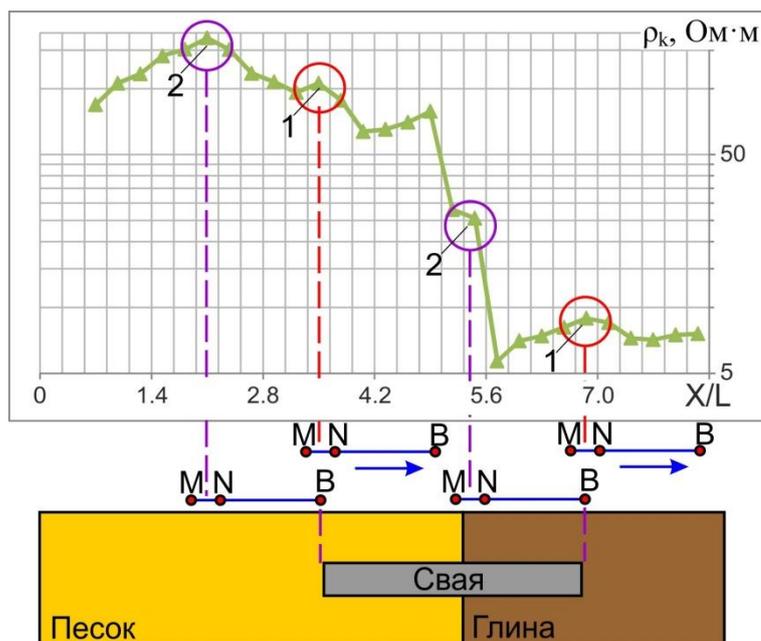


Рис. 4.17 Результаты моделирования установкой MNB при положении геологической границы посередине сваи

1 – основной максимум, 2 – дополнительный максимум на расстоянии разноса установки

В более сложной ситуации, когда положение конца сваи совпадает с положением геологической границы, полезный сигнал попадает в область резкого изменения графиков сопротивления над контактом слоев. На самом контакте графики профилирования имеют сложную форму, усугубленную различием условий возбуждения и приема, неоднородностями вблизи приемных и питающих электродов. Наибольшая амплитуда экстремумов графиков профилирования связана с геологической границей. Определение погруженной части фундамента в данной ситуации является более неоднозначной задачей.

В ходе решения данной задачи результативным оказалось применение комбинированного электропрофилерования установками AMN и MNB. Анализ графиков ЭП позволил сформировать следующие критерии интерпретации.

При измерении трехэлектродной установкой сигнал от конца сваи представлен двумя максимумами. Первый максимум – основной – наблюдается при положении точки записи непосредственно над концом сваи. Второй максимум – дополнительный – находится от него на расстоянии длины зонда, положение зависит от ориентации установки наблюдений. При измерении прямой установкой AMN второй максимум располагается после основного, когда токовый электрод находится над концом сваи (рис. 4.18). При измерении обращенной установкой MNB дополнительный максимум наблюдается на расстоянии длины зонда до конца сваи, что также определяется положением питающего электрода (рис. 4.17, 4.19).

При определении положения конца сваи, если существует вероятность, что он может совпадать с геологической границей, целесообразно проведение скважинных измерений в модификации комбинированного электропрофилирования с использованием зонда AMNB. Заключение о величине заглубленной части фундамента в подобной ситуации стоит давать по дополнительным максимумам.

Кроме характерной формы графиков ЭП, внимания заслуживает величина аномального эффекта от конца сваи. Основной максимум относительно фоновых значений характеризуется амплитудой аномалии 20-100%, амплитуда дополнительного максимума несколько меньше (от 10%). В общем случае величина аномального эффекта будет зависеть от расстояния между сваем и скважиной, размера установки или длины зонда, а также от соотношения электрических свойств грунтов различного состава и материала, из которого изготовлена заглубленная часть фундамента, его конструкции и состояния.

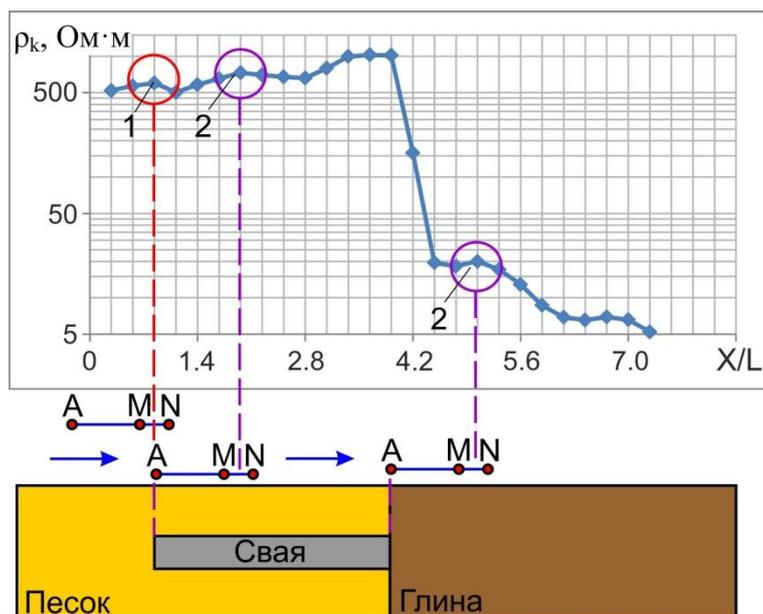


Рис. 4.18 Результаты моделирования установкой AMN при совпадении геологической границы с концом сваи

1 – основной максимум, 2 – дополнительный максимум на расстоянии разноса установки

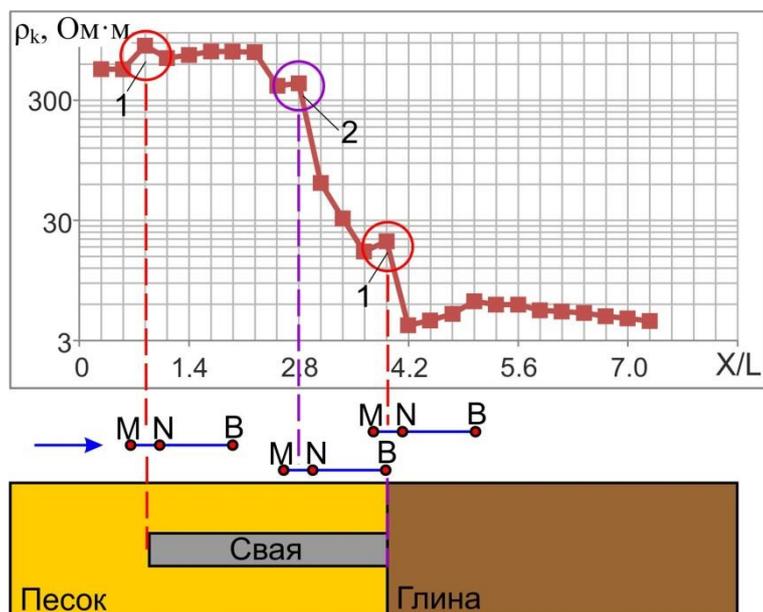


Рис. 4.19 Результаты моделирования установкой MNB при совпадении геологической границы с концом сваи

1 – основной максимум, 2 – дополнительный максимум на расстоянии разноса установки

Обобщенные результаты анализа данных физического моделирования при определении заглубленной части свайного фундамента представлены в виде схематичных графиков комбинированного электропрофилирования на примере одиночной сваи, находящейся в двухслойной геологической среде (рис. 4.20).

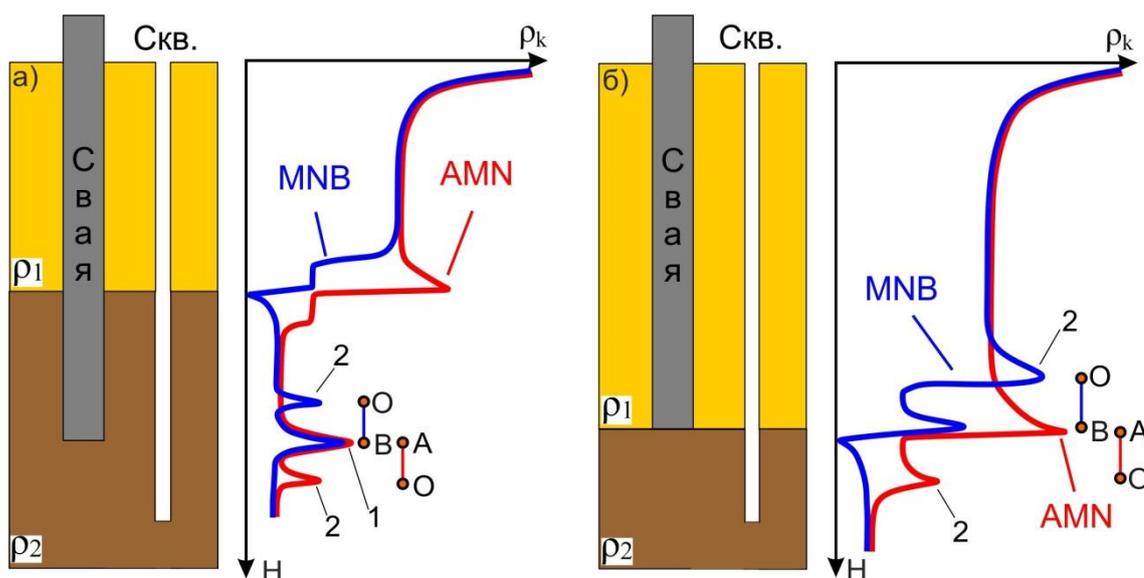


Рис. 4.20 Схематичные графики электрического каротажа в модификации КЭП при определении заглубленной части свайного фундамента в двухслойной геологической среде ( $\rho_1 > \rho_2$ ): а) – при положении границы слоев посередине сваи, б) – при положении геологической границы на глубине погружения сваи

1 – основной максимум, 2 – дополнительный максимум на расстоянии разноса установки

По результатам моделирования определена методика проведения полевых работ и ключевые критерии для интерпретации результатов наблюдений.

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

На основании результатов моделирования разработана методика определения величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений методами электрического каротажа на постоянном токе. Исследование по защищаемой методике предлагается проводить, когда изучение прямыми методами вскрытия затруднено, но существует возможность выполнить проходку горной выработки в непосредственной близости от фундамента на расстоянии, близком к длине зонда. На основании результатов моделирования разработан следующий порядок наблюдений.

#### **4.3.1 Методика полевых наблюдений**

1. Для измерений рекомендуется использование трехэлектродных зондов AMN и MNB длиной около 1 м или зонда ANMB (при измерении в модификации КЭП) длиной около 2 м. Размер зондов является оптимальным и выбран по результатам моделирования исходя из требуемой чувствительности, величины аномального эффекта, разрешающей способности, глубинности исследований с учетом реальных геотехнических условий. Для определения свойств, строения грунтового основания и уменьшения неоднозначности решения обратной задачи рекомендуется использование зонда A'MN малой длины.

2. Бурение параллельной фундаменту скважины необходимо выполнять на расстоянии, сравнимым с длиной зонда (1–2 м), по возможности, на максимальном приближении.

3. Проходка горной выработки может быть выполнена с использованием ручного бура, мотобура или более сложных буровых установок (УБШМ, АВБ, УРБ и т.д.). Для проведения исследований достаточным является диаметр скважины 50-80 мм.

4. Забой скважины, в зависимости от конструкции применяемого зонда, должен находиться на расстоянии не менее  $1,5 L$  (где  $L$  – длина зонда) ниже предполагаемой отметки погружения фундамента.

5. На основании результатов бурения или по имеющейся априорной информации изучается строение грунтового основания. Для проведения исследований в средах, близких по строению к однородным, достаточно использование трехэлектродного зонда AMN; в слоистых средах – зонда ANMB (в модификации КЭП).

6. Измерения методом электрического каротажа на постоянном токе для контроля качества материалов наблюдений необходимо проводить на «спуске» и «подъеме».

7. Измерения могут быть выполнены с использованием любой серийной электроразведочной аппаратуры непрерывно или дискретно в одноканальном или многоканальном режимах.

8. При дискретных измерениях шаг наблюдений определяется исходя из требуемой детальности. Рекомендуемый шаг измерений составляет 10-20 см.

#### **4.3.2 Методика обработки и интерпретации**

1. Обработка результатов наблюдений заключается в построении и анализе графиков электропрофилирования. Графики строятся без использования нормализации, сглаживания или других процедур регуляризации. Графики, полученные на «спуске» и «подъеме», анализируются совместно.

2. Интерпретация результатов наблюдений при определении величины загубленной части фундамента, его конструкции и состоянии заключается в выделении пар «основного» и «дополнительного» максимумов графиков кажущихся сопротивлений, обладающих соответствующей величиной аномального эффекта. Ключевым критерием интерпретации является наличие «основного» максимума при положении точки записи

напротив конца сваи и наличие «дополнительного» максимума, когда напротив конца сваи находится питающий электрод. При измерении установкой MNB «дополнительный» максимум расположен на расстоянии длины зонда до «основного», и после него при измерении установкой AMN. В ходе интерпретации используется информация о строении грунтового основания (полученная по данным бурения или априорная). Экстремумы графиков КС, связанные с влиянием строения геологической среды, отбраковываются. При дискретных измерениях погрешность интерпретации определяется шагом исследования по глубине  $\Delta H$  и может варьироваться в пределах  $\pm(\Delta H/2)$ .

3. По результатам скважинных наблюдений также может быть дано заключение об электрических свойствах, строении и петрофизических характеристиках грунтового основания, положении уровня и минерализации грунтовых вод.

#### **4.4 Апробация и опыт применения защищаемой методики**

Апробация защищаемой методики выполнена в ходе опытно-методических работ на одной из крупных промышленных площадок предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» (Пермский край).

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 варьировался от 50 до 80 мм. По данным бурения, строение грунтового основания близко к однородной среде. Для выполнения исследований был сконструирован разборный зонд А0,7М0,2N (рис. 4.21), размеры которого выбраны исходя из результатов моделирования. Электроды выполнены из жестких пружин. Наблюдения проводились дискретно с шагом 0,1-0,2 м, измерения выполнены электроразведочной аппаратурой АМС-1. Кроме того были опробованы методики наземно-скважинных измерений с заземлением на фундамент [23, 45], которые не показала удовлетворительных результатов.

По результатам полевых наблюдений строились графики кажущихся сопротивлений. При интерпретации выполнено определение величины заглубленной части фундаментов и оценка их нарушения (рис. 4.22).



Рис. 4.21 Вид зонда. Выполнение скважинных измерений

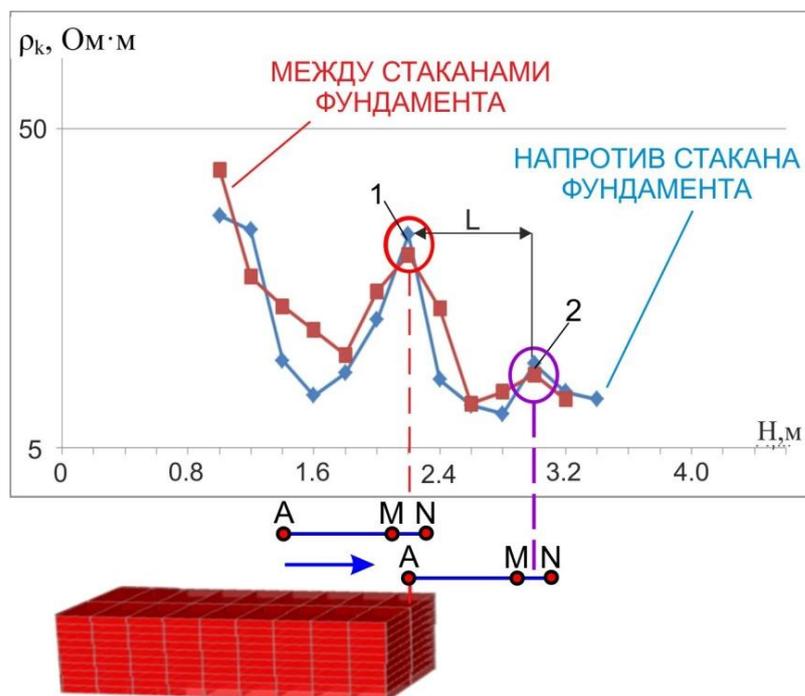


Рис. 4.22 Пример результатов скважинных опытно-методических работ по определению величины заглубленной части фундамента на застроенной территории

1 – основной максимум, 2 – дополнительный максимум на расстоянии длины зонда  $L$

В общей сложности исследования проведены в 11 скважинах. 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 (вскрышные работы и шурфование), которые подтвердили достоверность результатов интерпретации.

Таким образом, в ходе выполнения опытно-методических работ доказано, что в средах, близких по строению к однородным, предлагаемая методика дает однозначные результаты: величина заглубленной части фундамента определяется по положению основного максимума, на расстоянии длины зонда от которого наблюдается дополнительный максимум [9].

Результаты опытно-методических работ подтверждают данные моделирования и дают основание использовать данную методику в модификации комбинированного электропрофилирования при исследовании погруженной части фундаментов различных типов и конструкций в горизонтально-слоистых средах.

#### **4.5 Выводы к главе 4**

Результаты исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Разработана 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 информативным является комбинированное электропрофилирование 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 максимума. Первый (основной) максимум находится при положении точки записи непосредственно напротив конца сваи. Второй (дополнительный) максимум наблюдается, если напротив конца сваи находится питающий электрод. Дополнительный 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 дополнительного максимума несколько меньше. В случае объектов по ширине, превышающей длину зонда, чувствительность остается достаточной и на расстоянии 1-1,5 L

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 результатам анализа дополнительных максимумов. Из результатов опытно-методических работ следует, что критерии интерпретации справедливы для фундаментов различных типов и конструкций.

5. Данная методика обладает рядом существенных преимуществ, имеющих особое значение при практической реализации на этапах строительства, эксплуатации и реконструкции инженерных сооружений. Позволяет определять технические характеристики заглубленной части фундаментов, строение и свойства грунтового основания (литологический состав, положение УГВ, степень водонасыщения и другие).

Совокупность изложенных результатов является доказательной основой третьего защищаемого положения: *«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»*. Материалы исследований представлены в публикациях [2, 3, 5, 9, 12, 13]. На основании положительного результата, полученного в ходе апробации разработанной методики, третье защищаемое положение считаю доказанным.

## Заключение

Итогом диссертационных исследований является разработанная технология электрометрии на постоянном токе для оценки инженерно-геологических условий, направленная на обеспечение рационального и безопасного недропользования. Технология состоит из трех взаимосвязанных методик исследований, вынесенных в защищаемые положения. Основные результаты исследований, согласно трем защищаемым положениям, сводятся к следующему.

### 1. Исследование водных переходов:

1.1. Разработана методика уточнения инженерно-геологических условий на участках переходов линейных инженерных сооружений нефтяной инфраструктуры через водные преграды. Методика основана на использовании измерений со дна водоемов методами электрометрии постоянного тока и позволяет повысить детальность и оперативность геологических исследований за счет предложенной стадийности наблюдений.

1.2. На основании корреляционного анализа данных доказано, что донные наблюдения методами электрометрии, в сравнении с поверхностными измерениями, обладают большей разрешающей способностью, глубиной и рекомендуются для изучения тонкослоистых донных отложений при малоуглубинных исследованиях акваторий.

1.3. Определены преимущества использования донных электрометрических наблюдений в зимний период времени.

1.4. Показана эффективность применения автоматической инверсии на этапе постановки буровых работ.

1.5. Подтверждена необходимость использования аппарата 1D интерпретации при расчленении тонкослоистого разреза донных отложений на стадии истолкования с учетом результатов бурения.

1.6. Практическая значимость методики доказана в ходе исследований участков переходов линейных инженерных сооружений нефтяной инфраструктуры через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору и Харьягу.

2. Определение удельных электрических сопротивлений и петрофизических характеристик образцов дисперсных грунтов:

2.1. Выполнено теоретическое обоснование и совершенствование методики измерения удельных электрических сопротивлений образцов дисперсных грунтов с помощью микроустановки Шлюмберже.

2.2. Для образцов правильной формы установлены зависимости удельного электрического сопротивления от их размеров.

2.3. Изучено влияние анизотропии на результаты измерений удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов.

2.4. С использованием методики составлены распределения удельных электрических сопротивлений основных типов дисперсных грунтов для регионов Пермского края, Республики Коми и Тюменской области.

2.5. Показан замкнутый цикл ведения поисково-оценочных работ методами электрометрии для поисков месторождений грунтовых строительных материалов. На основании предложенной методики лабораторного измерения УЭС определены петрофизические характеристики грунтов, выполнено районирование территории, подсчет площади и объемов отложений различного литологического состава. Оценена перспективность грунтов семи нефтяных месторождений Западной Сибири: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, Им. Малыка, Западно-Эпасского. Получена необходимая информация для проектирования оптимального и безопасного освоения месторождений.

3. Определение величины заглубленной части фундаментов зданий и сооружений:

3.1. Дано теоретическое обоснование возможности использования скважинных методов электротометрии постоянного тока для определения величины заглубленной части фундаментов инженерных сооружений.

3.2. Установлены интерпретационные критерии для нахождения величины заглубленной части фундаментов в однородной и слоистой средах на основании численного и физического моделирования.

3.3. Разработана методика определения величины заглубленной части фундаментов скважинными методами электротометрии постоянного тока.

3.4. С помощью предложенной методики определена величина погружения фундаментов инженерных сооружений одной из промышленных площадок ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

При содействии и поддержке начальника отдела геофизических исследований д.т.н. А.В. Татаркина, защищаемая технология внедрена в производство на предприятии ООО НИПППД «Недра» (**Акт о внедрении результатов диссертационных исследований**).

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО НИПППД «Недра», д.г.-м.н.



В.В. Середин

«30» ноября 2021 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований А.А. Филимончикова

В период с 03.09.2012 г. по 23.04.2018 г. Филимончиков Александр Алексеевич являлся сотрудником отдела геофизических исследований Научно-исследовательского, проектного и производственного предприятия по природоохранной деятельности «Недра» (ООО НИПППД «Недра», г. Пермь).

В рамках деятельности отдела, при выполнении опытно-методических, научно-исследовательских и производственных работ, с участием Филимончикова А.А. были разработаны, апробированы и применены следующие методики исследований методами электрметрии:

– **методика исследования водных переходов** методами электрметрии постоянного тока применялась при изучении строения участков переходов линейных инженерных сооружений транспортной инфраструктуры нефтяных месторождений через реки Яйву, Колву, Ухту, Печору, Харьягу.

– **методика измерения удельного электрического сопротивления образцов дисперсных грунтов** применялась при лабораторных исследованиях в рамках проектирования инфраструктуры месторождений углеводородного сырья Пермского края, Республики Коми и Тюменской области; при поиске и оценке перспективности грунтовых строительных материалов вокруг семи нефтяных месторождений Западной Сибири: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинского, им. Малыка, Западно-Эпасского.

– **методика определения величины заглубленной части фундаментов** применялась при выполнении исследований на одной из промышленных площадок города Перми.

Перечисленные методики показали свою эффективность при выполнении геофизических исследований и успешно внедрены в ООО НИПППД «Недра».

Начальник отдела  
геофизических исследований, д.т.н.

 А.В. Татаркин

## Список литературы

### Работы автора, опубликованные по теме диссертации

1. Гилева М.И., Татаркин А.В., *Филимончиков А.А.* К вопросу определения удельного электрического сопротивления дисперсных грунтов в лабораторных условиях // Вестник Пермского университета. Геология. Вып. 1. 2014. С. 44-48.
2. Колесников В.П., Татаркин А.В., Пригара А.М., *Филимончиков А.А.* Инженерно-геофизические исследования в условиях подработанных территорий // Инженерные изыскания. Вып. 9. М., 2012. С. 25–32.
3. Колесников В.П., Татаркин А.В., *Филимончиков А.А.* О применении методов электротметрии в целях безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей // Геофизика. Вып. 5. 2011. С. 59–64.
4. 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. Вып. 12. 2014. С. 153-155.
5. Татаркин А.В., Голубев К.В., *Филимончиков А.А.* Определение методами электротметрии характеристик фундаментов при реконструкции и строительстве зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. Вып. 5. 2013. С. 30-32.
6. Татаркин А.В., *Филимончиков А.А.* Возможности 3D-инверсии данных электрических зондирований в условиях акваторий // Геофизика. Вып. 5. 2014. С. 21-25.
7. Татаркин А.В., *Филимончиков А.А.* Прогноз инженерно-геологических условий на участках переходов продуктопроводов через водные преграды // Вестник Пермского университета. Геология. Вып. 4., 2013. С. 28-35.
8. *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.
9. *Филимончиков А.А.* Физическое моделирование электрических полей для определения глубины залегания свайного фундамента в двухслойной среде // Геофизика. Вып. 5. 2016. С. 19-22.

10. *Филимончиков А.А.* Электроразведочные исследования в сложных инженерно-геологических условиях // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Пермь, ПГНИУ, 2017. С. 202-207.
11. *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.
12. *Филимончиков А.А., Татаркин А.В.* Оценка рисков изменений геотехнических условий на подработанных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. №4. 2014. С. 123-128.
13. *Филимончиков А.А., Татаркин А.В.* Уточнение инженерно-геологических условий при реконструкции зданий и сооружений // Геология в развивающемся мире. Т. 1. 2014. С. 291-293.
14. *Филимончиков А.А., Татаркин А.В., Гилева М.И.* Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов методами электротометрии // Записки Горного института. Т. 212. 2015. С. 130-134.

#### **Литературные и электронные источники**

15. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. №2. С. 14-17.
16. Бобачев А.А., Волков С.И., Коларов Д.Л., Модин И.Н., Мюллер А., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Комплексные акваторные электроразведочные исследования в восточной части Германии // Разведка и охрана недр. М., 2004.
17. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урсова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли, 1995 - N 12 - с.79-90.
18. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. 2008, N1, 43-47.
19. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ "Геоинформмарк". Выпуск 2. М., 1996, 50 с.
20. Бобачев А.А., Зайцев Д.А., Модин И.Н., Яковлев А.Г. Электротометрические исследования на территории хвостохранилища горно-обогатительного комбината // Разведка и охрана недр. № 12, 2006, с.25-29.

21. Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. Результаты электрометрических измерений на акваториях // Инженерная и рудная геофизика. Геленджик. 2009.
22. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М., 1965. 108 с.
23. Васильев Ю.Ю, Цыпченко Н.М. Использование геофизических методов для определения глубины погружения свай // НТВ «Каротажник», 2009. № 11. С. 72-80.
24. Геофизические методы исследования / Под ред. В.К. Хмелевского.- М.: Недра, 1988
25. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика / Под ред. В. М. Запорожца.— М.: Недра, 1983.
26. Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Протасов Н.С. Выявление зон инженерно-геодинамического риска по данным комплексных геофизических исследований подводных переходов проектируемых газопроводов // Инженерные изыскания. Вып. 11. М., 2011. С. 36–40.
27. ГОСТ 10650-72\*. Торф. Методы определения степени разложения.
28. ГОСТ 11305-83\*. Торф. Методы определения содержания влаги.
29. ГОСТ 11306-83\*. Торф. Методы определения зольности.
30. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
31. ГОСТ 23740-79. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ.
32. ГОСТ 30416-96. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
33. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
34. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
35. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: «Недра», 1982. 340 с.
36. Дахнов В.Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. М., Ленинград: ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1951. 428 с.
37. Донная электротомография при решении инженерно-геологических задач // Обзорная статья. <http://zond-geo.com/Articles/bottomert.pdf>
38. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика, 2-е изд.: М.: Недра, 1984.

39. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. М.: Недра, 1976.
40. Жуков А.А., Колесников В.П., Пригара А.М., Русских Е.И., Татаркин А.В., Филимончиков А.А. Метод подземного экспресс-зондирования для исследования околоштрекового пространства // Ежеквартальный научный сборник геологического факультета ПГНИУ. – Пермь: Перм. ун-т, 2012.
41. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник. – М.: МГУ, 2007.
42. Инженерная геология СССР. Т. II. Западная Сибирь. – М.: МГУ, 1976.
43. Каминский А.Е. Программа трехмерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) ZONDRES3D. 2001-2010 // Zond Geophysical software, 75 с. <http://zond-geo.ru>
44. Капустин В.В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. Вып. № 2. 2009. С. 113-117.
45. Квятковский Г.И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике. М.: Недра. 1993. 90 с.
46. Кобранова В.Н., Извеков Б.И., Пацевич С.Л., Шварцман М.Д. Определение петрофизических характеристик по образцам // М.: Недра, 1977. 432 с.
47. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М.: Научный мир, 2007.– 248 с.
48. Колесников В.П., Коноплев А.В., Пригара А.М., Татаркин А.В. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений // Современные проблемы науки и образования. Вып. 6. М., 2012. С. 8.
49. Костицын В.И. Упругие и электрические свойства многолетнемерзлых пород в условиях Крайнего Севера // Результаты бурения и исследования Тюменской сверхглубокой скважины. - Пермь: КамНИИКИГС ГНПП «Недра», 1995. С. 126-127.
50. Костицын В.И., Колосов А.И. О возможности объемного картирования пермских отложений геофизическими методами (на примере Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции) // Пермская система Земного шара. Международный геол. конгресс. – Пермь - Екатеринбург: УрО РАН, 1991. С. 250.
51. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. М: Недра, 1984. 270 с.

52. Лаломов Д.А., Глазунов В.В. Определение электрофизических параметров песчано-глинистого разреза при комплексном использовании георадиолокации и электротомографии // Инженерные изыскания. Вып. 5-6. М., 2015. С. 58-69.
53. Лейбович Л.О. Экологическая оценка территорий месторождений углеводородного сырья для определения возможности размещения объектов нефтедобычи / Лейбович Л.О., Середин В.В., Пушкарева М.В., Чиркова А.А., Копылов И.С. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. №12. 2012. С. 13-16.
54. Матвеев В.С., Рыжов А.А. Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований // Разведка и охрана недр. 2006. № 2. С. 50-57.
55. Матвеев Б.К. Электроразведка. М.: Недра. 1990. 368 с.
56. Методические рекомендации по применению комплекса геофизических методов при гидрогеологических и геоэкологических исследованиях на акваториях – М., Министерство природных ресурсов РФ, «ГИДЭК», 2002.
57. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
58. Официальный сайт компании НПФ Тенакон [http://tenakon.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=24&Itemid=46](http://tenakon.com/index.php?option=com_content&task=view&id=24&Itemid=46)
59. Патент RU 2448351 С2. Устройство для лабораторного измерения потенциала спонтанной поляризации (ПС) образцов горных пород / Ратушняк А.Н., Человечков А.И. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 10.08.2011. Бюл. № 22.
60. Пейнадо Э., Делгадо О., Рыжов А.А., Шевнин В.А. Совместный анализ геолого-геофизических параметров грунта в Синалоа, Мексика // Шестая международная научно-практическая конференция и выставка "Инженерная и рудная геофизика - 2010". Геленджик. 4 с.
61. Петров Ю.П., Костицын В.И. Совершенствование технологии геофизических исследований // Приборы и системы разведочной геофизики. № 1 (31). – Саратов: Саратовское отделение ЕАГО, 2010. С. 40- 42.
62. Потлов Г.Г. Методические особенности оценки ресурсов нерудных стройматериалов в районах железнодорожного строительства Сибири и Дальнего Востока. Нерудные ископаемые Западной Сибири. №32. 1971. С. 191-193.

63. Простов С.М., Герасимов О.В., Мальцев Е.А. Применение геофизических методов для определения глубины погружения буронабивных, буроинъекционных и железобетонных свай // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. № 5. С. 17-21.
64. Редозубов А.А., Виноградов А.М., Ратушняк А.Н. Специальный курс электроразведки: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 416 с.
65. РСН 64-87 Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка.
66. Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., 1990. С. 27-41.
67. Сайт М.Н. Лок в Интернете: [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)
68. Сайт А.Е. Каминского в Интернете: <http://kaminae.narod.ru/>
69. Сайт лаборатории малоглубинной электроразведки МГУ в Интернете: <http://www.geoelectric.ru/>
70. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Степанов И.Ю., Прийма Г.Ю., Чугаев А.В. Комплексование инженерно-геофизических методов при исследованиях фундаментов // Разведка и охрана недр. № 12. 2006. С. 32-36.
71. Середин В.В., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О., Бахарева Н.С., Методика инженерно-геологического районирования на основе бальной оценки классификационного признака // Инженерная геология. № 3. 2011. С. 20-25.
72. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства.
73. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96
74. Степанов Ю.И., Тайницкий А.А., Горожанцев А.В., Митюнина И.Ю. Опыт применения георадарной съемки // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. №18. 2018. С. 204-208.
75. Татаркин А.В. Оценка системы «Фундамент – грунтовое основание» // Геотехника. Т. XI, № 3, 2019. С. 52-62.
76. Фрич Ф. Электроразведка при инженерно-геологических исследованиях в строительстве. 1965.
77. Хмелевской В.К. Краткий курс разведочной геофизики, изд. 2-е. М.: МГУ, 1979. 287 с.

78. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. М.: МГУ, 1970. 245 с.
79. Хмелевской В.К. Электроразведка, изд. 2-е. М.: МГУ. 1984 г. С ил., 422 с.
80. Шаманский И.Л. Геолого-экономическая оценка ресурсов и месторождений минерального сырья, их задачи и связь с экономикой геологоразведочных работ / Шаманский И.Л., Никоноров С.П., Фахрутдинов Р.З. // Неерудные ископаемые. №28. 1969. С. 3-10.
81. Шевнин В.А., Бобачев А.А. 1D и 2D интерпретация зондирований методом сопротивлений // Материалы конференции ЕАГО ИнжГео-2011. 6 с.
82. Шевнин В.А., Рыжов А.А., Делгадо-Родригес О. Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений // Геофизика, № 4, 2006, с. 37-43.
83. Шувалов В.М. Комплексное применение методов геофизики на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений и коммуникаций // Вестник Пермского университета. Геология. Вып. 4 (13). 2011. С. 46-60.
84. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М., изд. МГУ, 1994 г., 160 с.
85. Электроразведка. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под редакцией В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Москва, 2005. 311 с.
86. Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л. Электроразведка. М.: Недра, 1982. 381 с.
87. Ярославцев А.Г., Бабкин А.И., Санфиров И.А., Фатькин К.Б., Пригара А.М. Способ сейсмического обследования свайных фундаментов // <https://findpatent.ru/patent/228/2280267.html>
88. Dahlin and Zhou, 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays. Geophysical Prospecting, 52. P. 379–398.
89. Dong P., Fan J., Chen Z., Wang L. et al. Applying mise-a-la-masse method to determine the length of reinforcement in bored in situ concrete piles. J ENVIRON ENG GEOPHYS. June 2008. V. 13. No. 2. P. 51-56.
90. Evjen H. M., 1938. Depth factor and resolving power of electrical measurements: Geophysics. 3. P. 78-95.
91. Loke M.H., 2002. Tutorial - 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 110 p.
92. Loke, M.H. and Barker, R. D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44. P. 131-152.

93. Maillet R. 1947. The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*. Vol. XII, N 4. P. 529-556.
94. McGillivray P.R., and Oldenburg D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the nonlinear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting*. P. 499-524.
95. Merrick, N.P. 1997. A new resolution index for resistivity electrode arrays: *Exploration Geophysics*. N 28. P. 106–109.
96. Roy, A., and Apparao, A., 1971, Depth of investigation in direct current methods: *Geophysics*. N 36. P. 943–959.
97. Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A. and Ryjov A. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica Internacional* (2006), Vol. 45, N. 3, pp. 195-207.
98. Shevnin V., Mousatov A., Ryjov A., Delgado O. Estimation of clay content in soil based on resistivity modeling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55, N2, 265-275.
99. Szalai S., Novak A. and Szarka L. Depth of Investigation and Vertical Resolution of Surface Goelectric Arrays. *JEEG*, March 2009, Vol. 14, N 1, 15–23.
100. Waxman M.H. and L.J.M. Smits, 1968, Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands: *Journal of the Society of Petroleum Engineering*, 8, 107-122.