

Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе

На правах рукописи

Кауркин Михаил Дмитриевич

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИПОЛЬНЫХ ЗОНДОВ  
КАРОТАЖА СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЗОНДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
КАРОТАЖА С ТОРОИДАЛЬНЫМИ АНТЕННАМИ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н. Каринский А.Д.

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Методы ГИС для определения удельного электрического сопротивления и параметров электрической анизотропии горных пород.....	11
1.1. Краткий обзор истории развития электрических и электромагнитных методов исследования скважин.....	11
1.2. Методы определения удельного электрического сопротивления горных пород при каротаже нефтяных и газовых скважин.....	13
1.3. Проблема определения параметров электрической анизотропии горных пород при геофизических исследованиях скважин.....	31
1.4. Применение зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов при геофизических исследованиях скважин.....	36
Выводы.....	43
Глава 2. Лабораторное моделирование зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.....	44
2.1. Лабораторные установки, применённые при физическом моделировании.....	44
2.2. Аппаратура, применённая при лабораторном моделировании.....	50
2.3. Методика проведения лабораторного моделирования.....	54
2.4. Особенности проведения лабораторного моделирования.....	57
Выводы.....	67
Глава 3. Методы, применённые при математическом моделировании.....	69
3.1. Методика численных расчётов при осевой симметрии лабораторной установки.....	70
3.2. Решение прямой задачи теории каротажа КС при смещённом с оси симметрии модели среды точечном токовом электроде и анизотропии окружающей скважину среды.....	77
Выводы.....	82
Глава 4. Результаты лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.....	83

4.1. Результаты лабораторного моделирования дипольно-осевых зондов .....	83
4.2. Результаты лабораторного моделирования осевых зондов с тороидальными антеннами.....	100
4.3. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториальных зондов .....	104
Выводы .....	113
Глава 5. Интерпретация результатов измерений с дипольно-экваториальными зондами .....	115
5.1. Интерпретация результатов измерений, полученных при лабораторном моделировании .....	115
5.2. Возможность определения электрических параметров горных пород по результатам измерений полученных дипольно-экваториальным зондом в скважине .....	121
Выводы .....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	125
Библиография .....	127

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность проблемы

Явление электрической анизотропии горных пород было выявлено К. Шлюмберже ещё в 1920 г., однако и в настоящее время её изучение и влияние на результаты геофизических исследований вызывает большой интерес. Сущность явления анизотропии заключается в различии значений параметров (электрических, тепловых, магнитных и других) по разным направлениям, в частности, может проявляться в удельном электрическом сопротивлении горных пород. Анизотропия присуща многим горным породам. Для характеристики параметров анизотропных пород наиболее часто применяется модель среды с осевой анизотропией (одноосно-анизотропная среда). Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  такой среды характеризуют два значения: поперечное удельное электрическое сопротивление  $\rho_n$  по оси анизотропии  $n$  (ориентированной по нормали к напластованию пород) и продольное удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$  по любому ортогональному оси  $n$  направлению  $t$ .

Основная проблема в определении параметров электрической анизотропии горных пород при каротаже заключается в том, что применяемые на практике методы электрметрии часто не могут предоставить информацию о значении поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n$ . Это связано с тем, что при (типичном в условиях платформ) субгоризонтальном залегании пластов и прослоев, слагающих терригенные осадочные породы-коллекторы, результаты измерений, применяемых (при общих и детальном исследованиях) электрических и электромагнитных методов геофизических исследований скважин в вертикальных скважинах зависят, в основном, от параметра  $\rho_t$ . В связи с этим при указанных условиях по данным ГИС нельзя получить информацию о поперечном удельном электрическом сопротивлении  $\rho_n$  и коэффициенте анизотропии  $\lambda$ , пройденных скважиной анизотропных пластов-коллекторов. Однако для определения наиболее значимых для практики

характеристик анизотропных пластов-коллекторов, например, типа их насыщения, параметр  $\rho_n$  является более информативным, чем  $\rho_t$ .

Интерес к изучению электрической анизотропии горных пород при геофизических исследованиях скважин отражен в работах таких учёных, как Л.М. Альпин, М.И. Эпов, А.Д. Каринский, В.В. Вержбицкий, Ю.А. Дашевский, А.Е. Кулинкович, А.И. Сидорчук, Л.А. Табаровский, Е.В. Чаадаев, А.А. Кауфман, А.М. Каганский и др.

В частности, в работах Л.М. Альпина [1970, 1978] высказана идея о том, как можно получить данные о «вертикальном» (поперечном) удельном электрическом сопротивлении  $\rho_n$  анизотропных горных пород путём перемещения измерительного электрического диполя  $MN$  в поле неподвижного удаленного от анизотропных пластов токового электрода. В работах А.Е. Кулинковича [1958], А.И. Сидорчука [1972], Е.В. Чаадаева [1972, 1977] было высказано утверждение, что анизотропия пластов может проявиться в усложнении формы каротажных диаграмм для градиент-зондов каротажа КС.

В работах М.И. Эпова, А.Д. Гайдаша, В.А. Пантюхина, К.Л. Санто, Е.В. Чаадаева, S. Gianzero, S. Graciet, T. Hagiwara, K. S. Kunz, J.H. Moran, L.C. Shen, M.S. Zhdanov и других ученых предметом исследований являлось влияние анизотропных сред на компоненты низкочастотного магнитного поля переменного магнитного диполя.

Вместе с тем рядом зарубежных ученых Hans-Martin Maurer, David R. Beard, Rashid W. Khokar, Stanley C. Gianzero, James H. Moran, Peter T. Wu, Robert A. Moore, Paul Sinclair, Roland E. Chemali, Shey-Min Su, Brian Clark, Stephen D. Bonner, Jacques Jundt, Martin Luling, Richard A. Rosthal, Abdullah A. Bagersh, Paul L. Sinclair, Michael S. Bittar, Dean M. Homan, Dzevat Omeragic, Burkay Donderici были получены патенты на изобретения, связанные с применением тороидальных антенн при геофизических исследованиях скважин.

Из выше сказанного следует, что изучением и разработкой методов определения параметров электрической анизотропии горных пород в разное время занимались многие учёные. Интерес к изучению электрической

анизотропии горных пород можно объяснить тем, что параметры анизотропии содержат важную геолого-геофизическую информацию о строении и свойствах пород, слагающих толщу. В частности, продольное и поперечное удельные электрические сопротивления по-разному зависят от характера насыщения пород, их фильтрационных свойств и ряда других факторов. Поэтому разработка методов ГИС, по результатам которых можно определить значения  $\rho_n$  или  $\lambda$ , пройденных скважиной пластов, является задачей, важной не только для развития теории методов каротажа КС, но и для практики – определения параметров пластов при поисках и разведке месторождений углеводородов.

Для оценки перспективности применения зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов при геофизических исследованиях скважин и определения параметров  $\rho_n$  и  $\lambda$  анизотропных пластов было проведено лабораторное моделирование, результаты которого приведены в этой работе.

### **Цель работы**

Обоснование методики определения поперечного удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии пройденных скважиной горных пород при помощи измерений разными типами зондов и оценка перспективности применения дипольных зондов и зондов с тороидальными антеннами при геофизических исследованиях скважин на основе лабораторного моделирования.

### **Основные задачи исследований**

1. Выбор оптимальных материалов для изготовления моделей пластов с необходимыми характеристиками.
2. Конструирование лабораторных моделей пройденных скважиной пластов для экспериментов с различными типами макетов зондов.
3. Создание макетов зондов электрического и электромагнитного каротажа.
4. Оценка влияния различных факторов, искажающих результаты измерений, и принятие соответствующих мер по их устранению.

5. Проведение лабораторных экспериментов макетами зондов с тороидальными антеннами и дипольными зондами в различных моделях пройденных скважиной пластов.

6. Анализ результатов лабораторного моделирования и сопоставление с данными математических расчётов.

7. Апробация методики определения поперечного удельного электрического сопротивления по результатам измерений дипольно-экваториального и дипольно-осевого зонда.

### **Научная новизна**

1. Созданы оригинальные лабораторные установки для моделирования различных типов зондов, позволяющие смоделировать влияние пройденных скважиной пластов на показания дипольных зондов каротажа КС и зондов с тороидальными антеннами.

2. Экспериментально установлено, что параметры лабораторной модели, окружающей скважину среды одинаково влияют на результаты измерений, полученных макетом осевого зонда с тороидальными антеннами и макетом дипольно-осевого зонда.

3. Экспериментально установлено, что параметры окружающей скважину среды оказывают на значения  $\rho_k$  дипольно-экваториального зонда (ДЭЗ) существенно иное влияние, чем на значения  $\rho_k$  других зондов каротажа КС.

4. Обоснована и экспериментально подтверждена методика определения поперечного удельного электрического сопротивления по результатам измерений, полученных с дипольно-экваториальным зондом.

### **Практическая ценность**

Результаты лабораторного моделирования показали, что применение дипольно-экваториальных зондов в комплексе с другими методами электрического и электромагнитного каротажа позволяет определить параметры  $\rho_n$  и  $\lambda$  анизотропных пластов. Это может служить основанием для применения таких зондов при геофизических исследованиях скважин с целью определения параметров электрической анизотропии горных пород.

### **Защищаемые положения**

1. Экспериментально подтверждено, что при расположении зондов в модели скважины, параметры окружающей её среды оказывают одинаковое влияние на результаты измерений, полученные зондами с тороидальными антеннами и зондами с электрическими диполями.

2. Результаты экспериментов, подтверждённые численными расчётами, показали, что параметры окружающей скважину среды оказывают на значения  $\rho_k$  дипольно-экваториального зонда существенно иное влияние, чем на значения  $\rho_k$  других зондов каротажа КС. При удельных электрических сопротивлениях пластов, более высоких, чем  $\rho$  скважины, значение  $\rho_k$ , полученное с дипольно-экваториальным зондом, уменьшается с увеличением  $\rho$  этих пластов.

3. Результаты моделирования показали, что в вертикальных скважинах при горизонтальном залегании прослоев в анизотропных пластах, данные, полученные дипольно-экваториальным зондом в комплексе с другими электрическими и электромагнитными методами каротажа, позволяют определить коэффициент анизотропии и поперечное удельное электрическое сопротивление пройденных скважиной горных пород.

### **Степень достоверности результатов**

О достоверности результатов исследований свидетельствует сопоставимость данных, полученных с разными видами измерительной аппаратуры, а также совпадение результатов физического и математического моделирования.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: X Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», 2011; VI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле», 2012; V всероссийская научно-практическая конференция «Геология в развивающемся мире», 2012; XI Международная конференция «Новые идеи в

науках о Земле”, 2013; VI научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире», 2013; XV Международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2014», 2014; VII научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире», 2014; VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодые – наукам о земле”, 2014; XII Международная конференция “Новые идеи в науках о Земле”, 2015.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 2 статьи в печатных изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, 1 статья в электронном журнале и 13 тезисов докладов. Статьи опубликованы в следующих научных журналах: «Геофизика», «Каротажник».

### **Личный вклад**

Вклад автора в результаты исследований заключается в конструировании лабораторных установок, подготовке и проведении физических экспериментов, обработке полученных результатов, разработке мер по снижению влияния различных факторов, искажающих результаты измерений. Все результаты лабораторного моделирования, вошедшие в диссертационную работу, были получены лично автором.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из 5 глав, введения и заключения, содержит 138 страниц машинописного текста, 92 рисунка, 3 таблиц, библиографию из 108 наименований.

Работа выполнена на кафедре геофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

### **Благодарность**

Автор глубоко благодарен научному руководителю, доктору физико-математических наук, А.Д. Каринскому за предоставление интересной темы для научного исследования, проведение математических расчётов и помощь на всех этапах написания работы.

Автор признателен П.В. Новикову, В.Н. Орлову, Д.С. Даеву, С.Б. Денисову за консультации по тематике диссертационной работы.

Автор выражает благодарность заведующему лабораторией инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования ФГБУН Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН) В.В. Севостьянову за предоставление аппаратуры для проведения лабораторного моделирования и поощрение научных исследований, не связанных с тематикой лаборатории, а также сотрудникам И.Г. Менделю, Б.А. Трифонову, Н.А. Рагозину за консультации и ценные советы.

Отдельную благодарность автор выражает своей жене Кауркиной А.С. за проявленное ею терпение и поддержку.

## **Глава 1. Методы ГИС для определения удельного электрического сопротивления и параметров электрической анизотропии горных пород.**

### **1.1. Краткий обзор истории развития электрических и электромагнитных методов исследования скважин.**

Активное развитие геофизических методов исследований скважин началось после того, как 5 сентября 1927 г. на нефтяном месторождении Пешельбронн во Франции братьями Конрадом и Марселем Шлюмберже был проведён первый пробный электрический каротаж [104]. Аппаратура для него была разработана и изготовлена Г.Г. Доллем. В 1929 г. по инициативе Д. В. Голубятникова электрический каротаж начали широко применять и в СССР. Первые работы были выполнены в объединениях «Грознефть», «Азнефть», «Майкопнефть» и «Эмбанефть».

В 1931 г. на основании анализа результатов электрических измерений, полученных советскими геофизиками и сотрудниками фирмы «Шлюмберже» в скважинах месторождений объединений «Азнефть» и «Грознефть», К. Шлюмберже был предложен новый метод электрометрии скважин, который заключался в изучении потенциалов  $U_{\text{сп}}$  естественных электрических полей горных пород в условиях их естественного залегания [50]. Этот метод получил название PS (потенциалов собственной поляризации пород) и значительно расширил круг задач решаемых электрометрией скважин.

В 1933 г. К. Шлюмберже была сделана попытка изучения разрезов скважин путем исследования остаточных электрических потенциалов, возникающих в горных породах после пропускания через них электрического тока. Однако этот способ исследования скважин, получивший название метода PP, не дал положительных результатов, и после нескольких лет опробования работы по этому методу были прекращены [26].

Отрицательные результаты, полученные при внедрении метода PP, показанные в работах [14, 15], явились следствием неправильного

представления о процессах, порождающих вызванные потенциалы в горных породах, окружающих скважину.

В 1934 г. Л.Я. Нестеровым [53] был предложен одноэлектродный метод исследования разрезов скважин, основанный на измерении тока  $I$  в цепи заземления, опускаемого в скважину на одножильном кабеле; второй электрод при этом заземлен вблизи устья скважины. Величина тока  $I$  зависела от удельного электрического сопротивления  $\rho$  горных пород, окружающих токовый (питающий) электрод, а это в свою очередь позволяло разделять различающиеся по  $\rho$  породы, слагающие разрез скважины. В связи с простой схемой измерения и применением легкого одножильного кабеля одноэлектродный метод (токовый каротаж) оказался весьма удобным для изучения разрезов неглубоких скважин и для проведения работ в удалённых районах, где при небольших объемах исследований было нерационально проводить каротаж стандартными методами.

Для исключения влияния проводимости бурового раствора на величину сопротивления заземления был разработан метод изучения сопротивления заземления с помощью электрода, экранированного двумя другими однополярными электродами. Этот метод был назван метод сопротивления экранированного заземления [14, 18]. Особенно эффективна была схема экранированного заземления с автоматически управляемым экранном током, созданная фирмой «Шлюмберже» под руководством Г.Г. Долля [16].

В 1935 г. А.С. Семёновым и О.К. Владимировым была предложена модификация одноэлектродного метода, получившая названия метод скользящих контактов [57]. Особенность этого метода заключалась в измерении тока в цепи электрода небольшого размера, имеющего контакт со стенками скважины. Метод скользящих контактов был успешно применён для изучения разрезов рудных скважин.

Принцип исследования электрических свойств горных пород при помощи измерительных установок, скользящих по стенке скважины, был применён в микрометоде сопротивления экранированного заземления (микроСЭЗ), который

был разработан коллективом сотрудников кафедры промысловой геофизики Московского нефтяного института им. И.М. Губкина [26].

Магнитные методы изучения разрезов скважин в СССР начали разрабатывать в 1934-1936 гг., когда К.П. Козин и М.И. Бейсин предложили по магнитной восприимчивости горных пород изучать разрезы скважин [26].

В 1945 г. В.Н. Дахновым и А.А. Коржевым была разработана специальная измерительная установка и предложен новый метод исследования потенциалов вызванной поляризации пород  $U_{ВП}$  в скважинах. Этот метод изначально получил название электролитического каротажа. Метод исследования потенциалов вызванной поляризации пород, в отличие от метода РР, оказался весьма эффективным, особенно при исследовании угольных скважин [16].

В 1948 г. фирмой «Шлюмберже» под руководством Г.Г. Долля был разработан метод индукционного исследования скважин [24]. Позднее, в 1950 и 1951 годах фирмой «Шлюмберже» были разработаны методы микрозондов, а также метод бокового и микробокового каротажа [86, 87].

Современный этап развития электрических и электромагнитных методов исследования скважин можно охарактеризовать разработкой и применением следующих новых методов ГИС: сканирующего бокового и микробокового каротажа, метода наноэлектрического каротажа, каротажа сопротивлений в обсаженной скважине, 3D индукционного зондирования, каротажа в процессе бурения скважин, диэлектрического каротажа, высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования.

## **1.2. Методы определения удельного электрического сопротивления горных пород при каротаже нефтяных и газовых скважин.**

Согласно технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах РД 153-39.0-072-01 [64], геофизические исследования нефтяных и газовых скважин подразделяют на:

➤ общие, материалы которых служат для расчленения разрезов и выделения в них основных литолого-стратиграфических комплексов пород, перспективных и продуктивных отложений [64];

➤ детальные, которые выполняют в продуктивных и перспективных на нефть и газ интервалах с целью определения количественных характеристик пластов [64].

Общие исследования выполняют во всех скважинах по всему разрезу, вскрытому бурением [64]. Они обеспечивают:

- определение пространственного положения и технического состояния стволов скважин [64];
- выделение стратиграфических реперов и разделение разреза на литолого-стратиграфические комплексы и типы (терригенный, карбонатный, хемогенный, вулканогенный, кристаллический) [64];
- идентификацию литолого-стратиграфических комплексов, к которым приурочены продуктивные и/или перспективные на нефть и газ отложения [64];
- расчленение разреза на пласты, их привязку по относительным и абсолютным отметкам глубин, внутри- и межплощадную корреляцию разрезов [64];
- привязку интервалов отбора керн по глубине [64];
- литологическое изучение интервалов разреза, не охарактеризованных керном [64];
- привязку по глубине интервалов опробований, испытаний, перфорации, материалов геофизических исследований в обсаженных скважинах [64].

Детальные исследования во всех скважинах выполняют в продуктивных и перспективных на нефть и газ интервалах, в опорных и параметрических скважинах, также в неизученных ранее частях разреза [64]. В комплексе с материалами других видов исследований и работ (опробований, испытаний, керновыми данными и др.) они обеспечивают:

- расчленение изучаемого разреза на пласты толщиной до 0,4 м, привязку пластов по глубине скважины и абсолютным отметкам [64];
- детальное литологическое описание каждого пласта, выделение коллекторов всех типов (поровых, трещинных, каверновых и смешанных) и определение их параметров коэффициентов глинистости, общей и эффективной пористости, проницаемости, водо- и нефтегазонасыщенности (если эффективная толщина коллектора превышает 0,8 м) [64];
- разделение коллекторов по характеру насыщенности на продуктивные и водоносные, а продуктивных – на газо- и нефтенасыщенные [64];
- определение положений межфлюидных контактов, границ переходных зон, эффективных газо- и нефтенасыщенных толщин [64];
- определение пластовых давлений и температур [64];
- определение минерализации пластовых вод [64];
- прогнозирование потенциальных дебитов [64];
- прогнозирование строения геологического разреза в околоскважинном и межскважинном пространствах [64].

Как можно увидеть из приведенного выше списка задач, решаемых общими и детальными исследованиями, необходимость определения параметров анизотропии горных пород не отмечена.

Согласно таблице 3 технической инструкции РД 153-39.0-072-01 [64] можно выделить следующие основные методы электрометрии скважин, входящие в общие или детальные исследования, изучаемым параметром которых является удельное электрическое сопротивление горных пород:

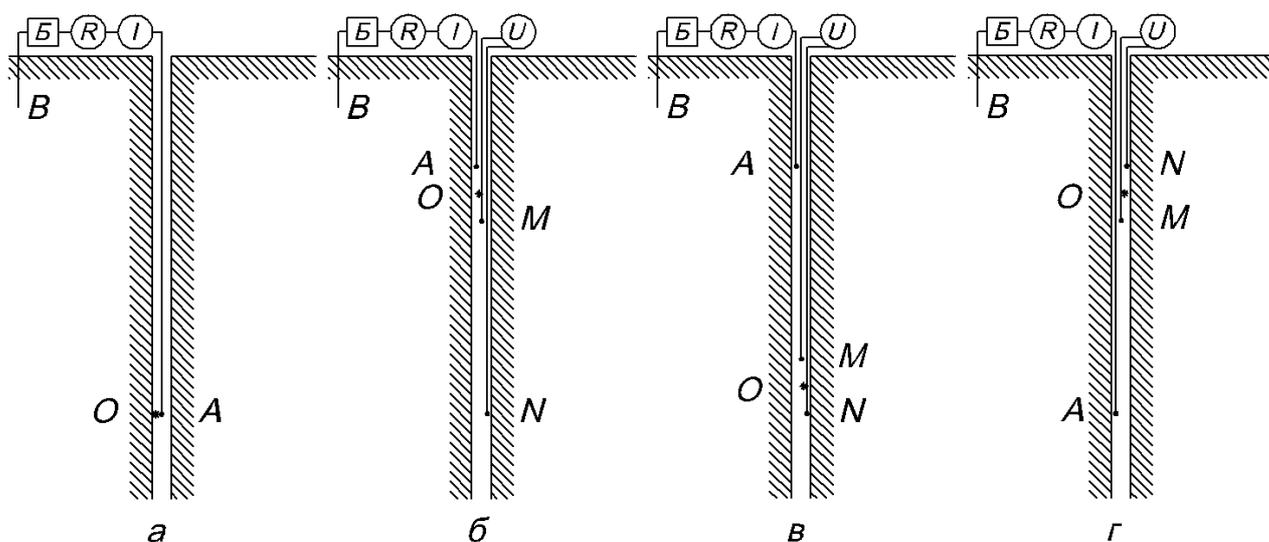
- метод кажущегося сопротивления (КС)
- боковое каротажное зондирование (БКЗ)
- боковой каротаж (БК)
- микрокаротаж (МК)
- боковой микрокаротаж (БМК)
- индукционный каротаж (ИК)

Среди дополнительных методов отдельно выделим высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных методов.

### ***Метод кажущегося сопротивления (КС).***

Метод кажущегося сопротивления является одним из основных методов геофизических исследований скважин. На практике при работах методом КС наиболее широкое применение нашли трёхэлектродные зонды, у которых три электрода находятся в скважине, а четвёртый электрод заземлён у поверхности земли, поблизости от устья скважины (рис. 1.1).

Трёхэлектродный зонд, состоящий из одного питающего  $A$  и двух приёмных  $M$  и  $N$  электродов, называется однополюсным, а состоящий из одного приёмного  $M$  и двух питающих  $A$  и  $B$  электродов, называется двухполюсным.

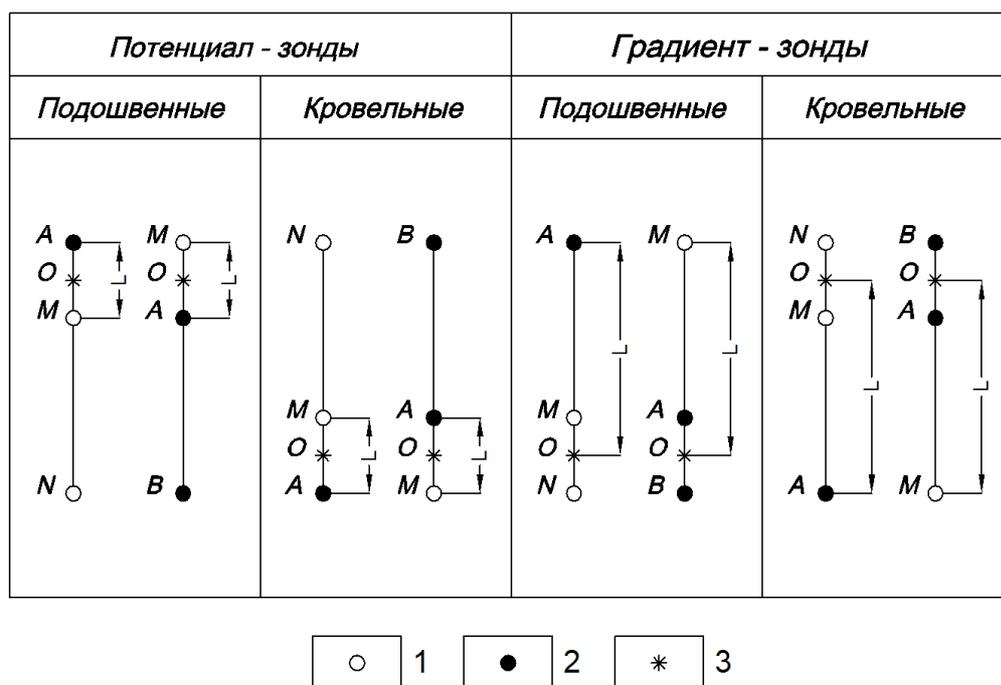


**Рис. 1.1.** Схема проведения каротажа КС [27].

$a$  – одноэлектродный зонд токового каротажа,  $б$  – трёхэлектродный потенциал-зонд,  $в$  – трёхэлектродный подошвенный (последовательный) градиент-зонд,  $г$  – трёхэлектродный кровельный (обращенный) градиент-зонд.

$A, B$  – питающие электроды,  $M, N$  – приёмные измерительные электроды,  $Б$  – батарея или другой источник питания,  $R$  – реостат для регулировки силы тока,  $I$  – прибор для измерения силы тока,  $U$  – прибор для измерения разности потенциалов,  $O$  – точка записи, к которой относят результат измерений;

Типы зондов метода КС представлены на рис. 1.2, среди которых выделяют два основных типа: градиент-зонды и потенциал-зонды.



**Рис. 1.2. Типы зондов метода КС [11].**

1 – приёмные измерительные электроды, 2 – питающие электроды, 3 – точка записи, к которой относят результаты измерений,  $L$  – длина зонда

*Потенциал-зондами* называют зонды, у которых расстояние между парными электродами, т. е. электродами одного назначения ( $AB$  или  $MN$ ), значительно больше расстояния от одного из этих электродов до ближайшего непарного, т. е.  $MN \gg AM$  или  $AB \gg AM$ . Расстояние между электродами  $A$  и  $M$  потенциал-зонда называют его размером, или длиной; измеряемое значение кажущегося сопротивления относят к средней точке отрезка  $AM$  (точке записи  $O$ ).

*Градиент-зондами* называют зонды, у которых расстояние между парными электродами ( $AB$  или  $MN$ ) значительно меньше расстояния от одного из них до непарного электрода, т. е.  $MN \ll AM$  или  $AB \ll AM$ . Величину измеряемого кажущегося сопротивления относят к точке, расположенной на середине расстояния между парными электродами (точке записи  $O$ ). Размером, или длиной зонда считают расстояния от удаленного электрода до точки записи. Принято полагать, что радиус исследования градиент-зонда примерно совпадает с его размером, а потенциал-зонда соответствует его удвоенному

размеру. Поэтому при одинаковом размере зондов радиус исследования потенциал-зонда в два раза больше чем градиент-зонда.

Кроме того, зонды подразделяются на последовательные (или подошвенные) и обращённые (или кровельные). Последовательными называют зонды, у которых парные электроды расположены ниже непарного; обращёнными – зонды, у которых парные электроды располагаются выше непарного.

Название зонда состоит из обозначения электродов, расположенных в скважине сверху вниз, и расстояний между ними в метрах.

Кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_k$  (в Ом·м) по результатам измерений с зондом КС определяет следующее выражение:

$$\rho_{\varepsilon} = k \frac{\Delta U}{I}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta U = \Delta U_{MN}$  – разность потенциалов электрического поля  $\mathbf{E}$  в приёмных электродах  $M$  и  $N$ ,  $I$  – электрический ток в линии  $AB$ ,  $k$  – коэффициент зонда.

Для однополюсного трёхэлектродного зонда КС (рис. 1.1, б, в, г) коэффициент зонда

$$k = 4\pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN}, \quad (1.2)$$

а для трёхэлектродного двухполюсного зонда (при расположении электрода  $M$  в скважине, а электрода  $N$  - вблизи устья скважины)

$$k = 4\pi \cdot \frac{AM \cdot BM}{AB}, \quad (1.3)$$

где  $AM$ ,  $AN$ ,  $MN$ ,  $AM$ ,  $BM$  – расстояния (в метрах) между соответствующими электродами.

Для зондов метода КС справедлив принцип взаимности, согласно которому величина  $\rho_k$  не изменится, если, сохранив расстояние между питающими и измерительными электродами, взаимно изменить их назначение, другими словами пропускать ток через  $M$  и  $N$ , а измерять разность потенциалов между заземлениями  $A$  и  $B$ .

На рис. 1.3 приведены примеры кривых, полученных в результате экспериментальных и теоретических исследований для зондов каротажа КС против однородных изотропных пластов при различных отношениях  $h/d$ ,  $\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{с}}$ ,  $\rho_{\text{вм}}/\rho_{\text{с}}$  [27].

Из рис. 1.3, *а* видно, что на кривой КС, записанной подошвенным градиент-зондом, мощный пласт высокого удельного сопротивления отмечается асимметричным максимумом [27]. При этом кровля пласта соответствует минимальному сопротивлению, а подошва – максимальному [27]. Тонкому пласту высокого удельного сопротивления соответствует максимум со слабо выраженной асимметрией [27]. Кровля его находится против точки наиболее крутого подъёма кривой, а подошва – несколько ниже максимума [27]. Ниже подошвы пласта на длину зонда наблюдается повышение сопротивления, вызванное экраным максимумом [27].

Мощный пласт низкого удельного сопротивления на кривой КС при измерениях с подошвенным градиент-зондом фиксируется асимметричным минимумом (рис. 1.3, *в*) [27]. При этом кровля пласта отмечается ниже максимума на половину расстояния между сближенными электродами, а подошва – минимумом [27]. Для тонких пластов низкого удельного сопротивления подошва на кривой КС фиксируется по переходу кривой сопротивления от пониженных значений к максимальным (рис. 1.3, *в*) [27].

При проведении измерений с кровельным градиент-зондом кривые  $\rho_{\text{к}}$  являются зеркальным отражением кривых, полученных подошвенным градиент-зондом [27]. Определение границ пласта кровельным градиент-зондом производится по тем же правилам, что и в случае подошвенного, но с учетом обратного хода кривой [27].

На кривой КС, полученной в результате измерений с потенциал-зондом, мощный пласт высокого сопротивления отмечается максимумом, симметричным относительно середины пласта [27]. При этом кровля пласта на половину длины зонда  $L/2$  выше точки перехода от плавного к более крутому подъёму кривой, а подошва – на  $L/2$  ниже этой точки [27].

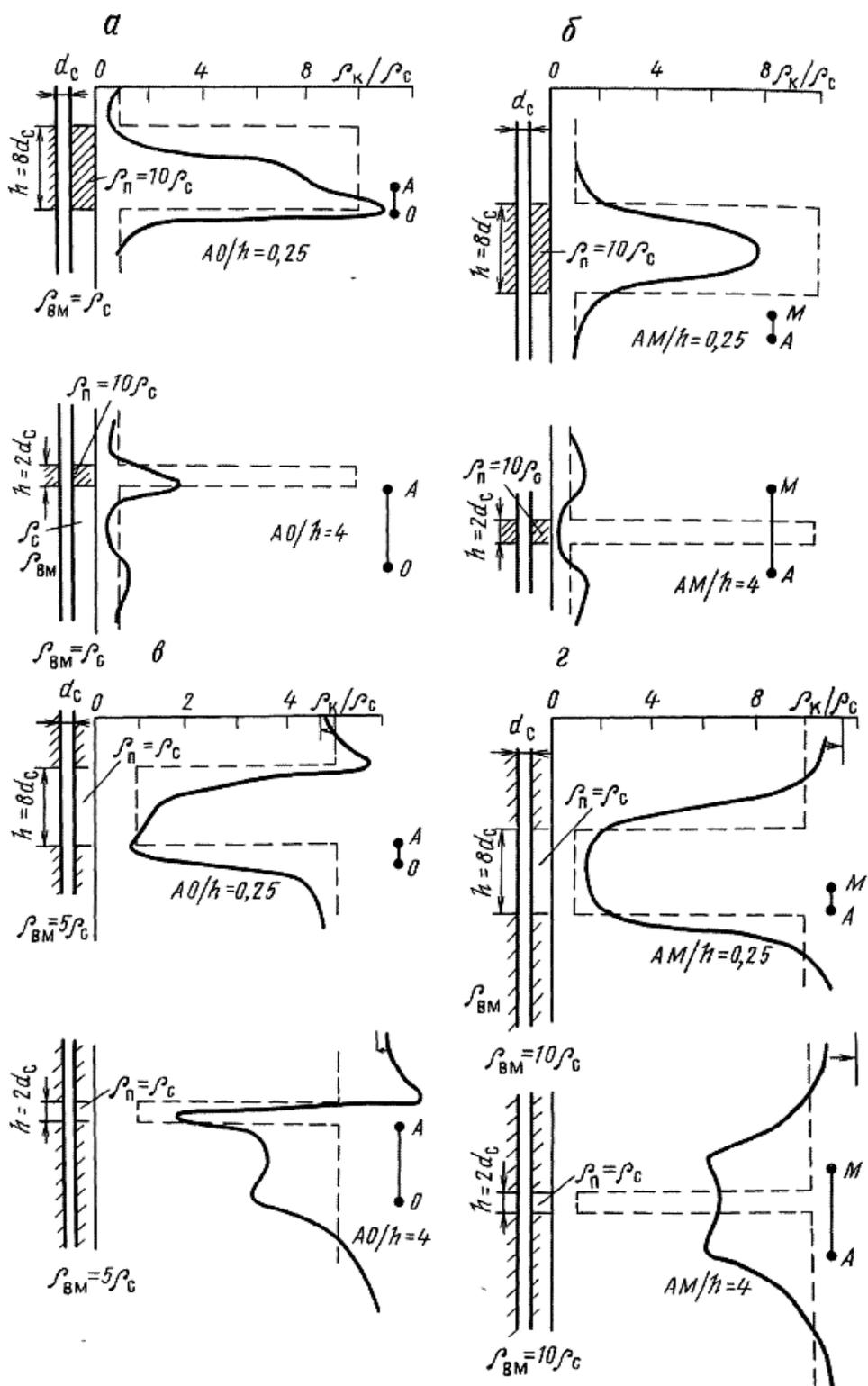


Рис. 1.3. Кривые  $\rho_k/\rho_c$  для однородного пласта с большим (а, б) и малым (в, г)  $\rho_n$  по сравнению с  $\rho_{вм}$  [27].

а, в – подошвенный градиент-зонд; б, г – потенциал-зонд

На этом рисунке  $h$  – мощность пласта,  $d_c$  – диаметр скважины,  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление скважины,  $\rho_n$  – удельное электрическое сопротивление пласта,  $\rho_{вм}$  – удельное электрическое сопротивление вмещающих пород,  $\rho_k$  – кажущиеся удельное электрическое сопротивление

В случае тонкого пласта высокого сопротивления фиксируется снижение  $\rho_k$ . При этом некоторое повышение  $\rho_k$  выше кровли и ниже подошвы пласта на расстоянии, равном половине длины зонда, вызваны экранными явлениями (рис. 1.3, б) [27].

Мощный пласт низкого сопротивления на кривой КС, полученной при измерениях с потенциал-зондом, отмечается минимумом, симметричным относительно середины пласта [27]. При этом его границы определяются по точкам перехода от крутого спада к плавному пониженному участку кривой с учетом того, что эти точки смещены относительно кровли и подошвы на половину длины зонда [27]. Таким образом, ширина минимума превышает мощность пласта на длину зонда [27]. Выделение границ тонкого пласта с низким значением  $\rho$  в этом случае затруднительно (рис. 1.3, в) [27].

Фактические записи зондов КС, полученные в условиях скважины, отличаются от теоретических кривых более сложной формой. Сложная форма фактических записей зондов КС объясняется тем, что значение  $\rho_k$  зависит от ряда величин, таких как размеры и УЭС зоны проникновения бурового раствора, УЭС вмещающих пород, УЭС бурового раствора и т.д. В результате по диаграммам КС можно получить лишь некоторое представление об удельных электрических сопротивлениях пород и об их изменении по разрезу скважины [27]. Для более точного определения удельного электрического сопротивления пластов по кривым кажущегося сопротивления применяют специальную методику – боковое каротажное зондирование [27].

### ***Боковое каротажное зондирование (БКЗ)***

Метод бокового каротажного зондирования (БКЗ) заключается в измерении кажущегося удельного электрического сопротивления набором однотипных зондов разной длины. Обычно боковое каротажное зондирование проводят градиент-зондами, поскольку потенциал-зондами невозможно выделить тонкие пласты высокого удельного электрического сопротивления. Зонды разного размера имеют неодинаковый радиус исследования. Поэтому значения  $\rho_k$ , полученные зондами БКЗ разной длины, по-разному зависят от

удельного электрического сопротивления скважины, зоны проникновения ( $\rho_{зп}$ ) и неизменённой проникновением бурового раствора части пласта ( $\rho_{п}$ ). Значение  $\rho_k$  при малых размерах зонда ( $L \ll d_c$ ) зависит главным образом от удельного электрического сопротивления бурового раствора  $\rho_c$ , при увеличении размера зонда на величину  $\rho_k$  все большее влияние оказывают  $\rho_{п}$  и  $\rho_{зп}$ , а при значительном превышении размера зонда над диаметром скважины и глубиной проникновения фильтрата бурового раствора значение  $\rho_k$  приближается к удельному электрическому сопротивлению неизменённой части пласта.

Интерпретация материалов БКЗ производится путем их сопоставления с расчётными данными (рис. 1.4). На основе решения 1D - прямых задач теории стационарного электрического поля были построены палетки БКЗ [Л.М. Альпин, С.Г. Комаров] для определения удельного электрического сопротивления пластов при отсутствии проникновения фильтрата промывочной жидкости (двухслойные палетки рис. 1.4) и при его наличии (трёхслойные палетки). Позже на основе этих же решений прямых задач были разработаны компьютерные программы для интерпретации результатов БКЗ.

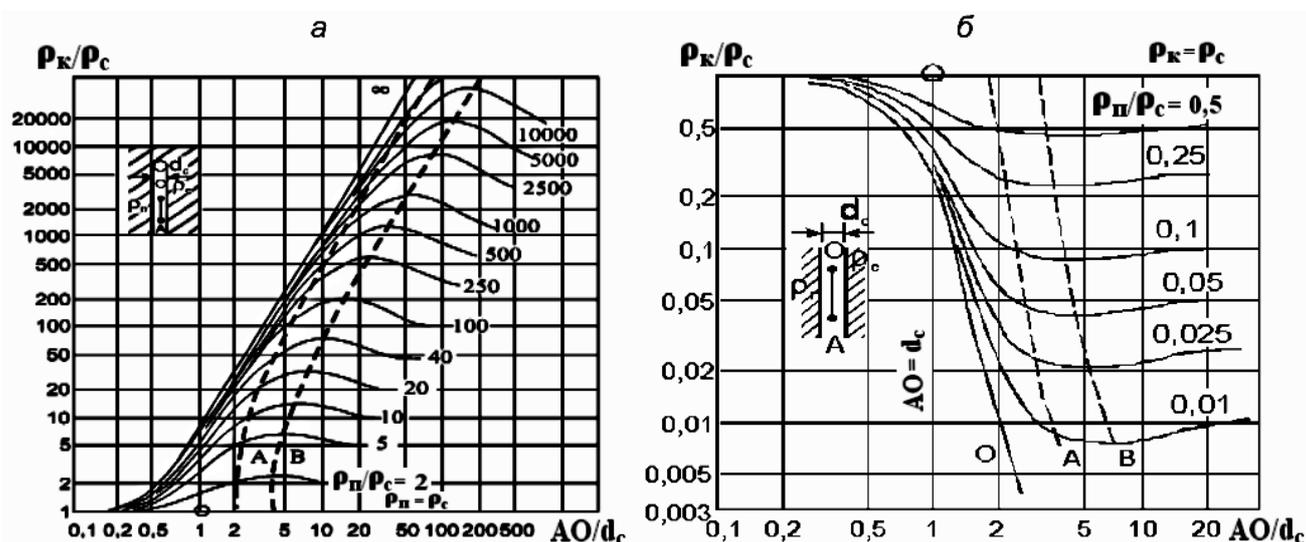


Рис. 1.4. Двухслойные расчетные кривые БКЗ сгруппированы в палетки (по Л.М. Альпину).

*a* – палетка БКЗ - 1А для градиент-зондов при  $\rho_{п} > \rho_c$ , *б* – палетка БКЗ-1Б для градиент-зондов при  $\rho_{п} < \rho_c$

Определение удельного электрического сопротивления пород методом БКЗ получило широкое распространение. Однако существуют трудности с

определением удельного сопротивления резко неоднородных пачек пластов, пластов высокого удельного сопротивления, а также при заполнении ствола скважины буровым раствором с низким удельным электрическим сопротивлением. Эти ограничения метода БКЗ связаны с существенным влиянием скважины, заполненной проводящим буровым раствором на результаты измерений зондов. Можно сказать, что скважина является шунтом для тока, текущего между питающими электродами, который ослабляет влияние окружающих скважину горных пород. Для преодоления проблемы влияния скважины были разработаны зонды с фокусированием электрического тока.

### ***Боковой каротаж (БК)***

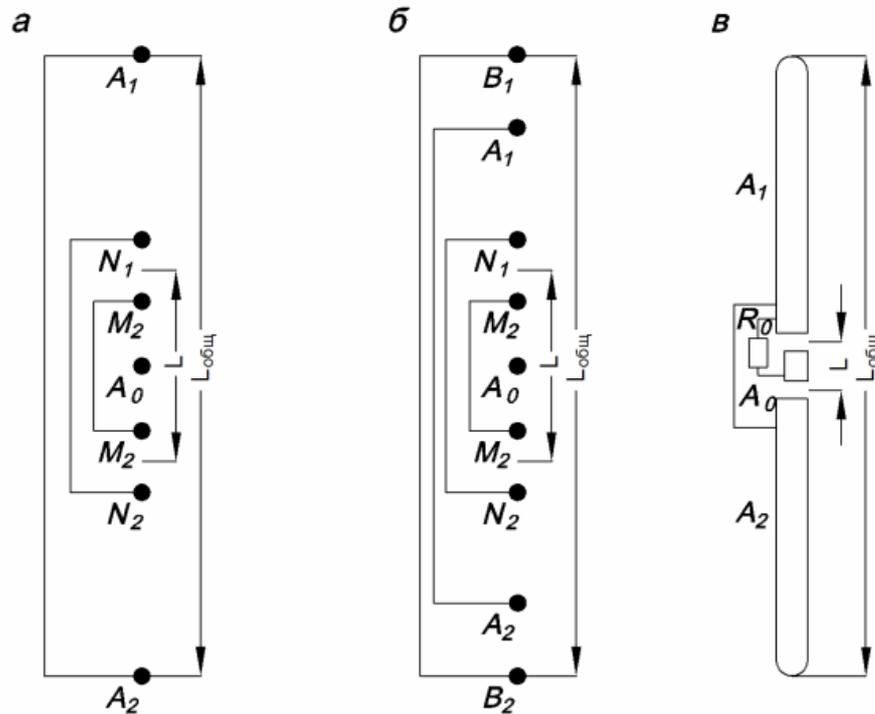
Боковой каротаж (БК) является разновидностью каротажа методом сопротивления, в котором электрическое поле, создаваемое зондом, является управляемым. Существуют трёх-, семи- и девятиэлектродные зонды бокового каротажа (рис. 1.5). Наибольшее распространение получил трёхэлектродный зонд бокового каротажа (рис. 1.5, в), который состоит из центрального электрода  $A_0$  и экранирующих электродов  $A_1, A_2$ , расположенных симметрично по отношению к  $A_0$ . Центральный электрод  $A_0$  соединён с экраным электродом  $A_1$  через шунтирующий резистор  $R_0$ .

Для измерения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  обеспечивается одинаковый потенциал всех электродов автоматическим регулированием силы тока через центральный электрод или при помощи соединения центрального электрода с экранирующим. Величина  $\rho_k$ , которая в боковом каротаже называется эффективным сопротивлением  $\rho_{\text{э}}$ , вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{э}} = k \frac{\Delta U}{I_0}, \quad (1.4)$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между одним из токовых электродов и удалённым электродом  $N$  (для трёхэлектродного зонда),  $I_0$  – сила тока текущего

через центральный электрод  $A_0$ ,  $k$  – коэффициент зонда, определяемый по специальным формулам.



**Рис. 1.5. Схема зондов бокового каротажа [27].**

*а* – семиэлектродный (БК - 7); *б* – девятиэлектродный псевдобоковой (ПБК); *в* – трёхэлектродный (БК - 3)

На этом рисунке  $L_{\text{общ}}$  – общий размер зонда,  $L$  – длина зонда равная расстоянию между серединами интервалов  $M_1N_1$  и  $M_2N_2$  (для семиэлектродного и девятиэлектродного зонда), для трёхэлектродного зонда расстояние между серединами интервалов изолирующих центральный электрод от экранирующих

Благодаря применению экранирующих электродов ток центрального электрода направлен непосредственно в исследуемый пласт. Поэтому влияние скважины, зоны проникновения и вмещающих пород на результаты измерений зондами бокового каротажа сказывается меньше, чем при измерении обычными зондами КС, а эффективное сопротивление получается близким к удельному электрическому сопротивлению пласта. Метод бокового каротажа рационально применять при исследовании скважин, заполненных солёным раствором низкого удельного сопротивления, а также для изучения разрезов, сложенных плотными горными породами с высоким удельным сопротивлением. В этих условиях метод бокового каротажа позволяет более детально произвести расчленение разреза и точнее определить удельное электрическое сопротивление пласта, нежели чем традиционный метод КС.

### Микрокаротаж (МК)

Метод микрокаротажа предназначен для выделения коллекторов в разрезах скважин, изучения их строения и определения удельного электрического сопротивления зоны проникновения бурового раствора. Сущность метода заключается в измерении  $\rho_k$  зондами с очень малыми расстояниями между электродами. Для уменьшения влияния бурового раствора электроды установлены на специальном "башмаке" из нефтестойкой резины, прижимаемом к стенке скважины. На рис. 1.6 показан общий вид зонда микрокаротажа и схема распределения токовых линий в промытой зоне.

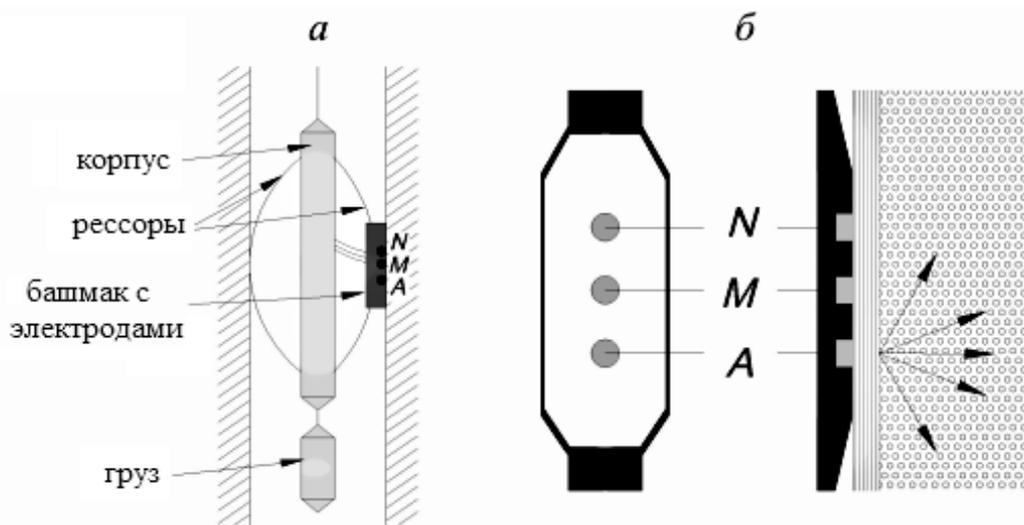


Рис. 1.6. Общий вид зонда микрокаротажа (а) и схема распределения токовых линий в промытой зоне (б) [25].

Величина  $\rho_k$  по результатам измерения с микрозондами вычисляется так же, как в методе КС по формуле (1.1). Однако коэффициенты микрозондов определяют экспериментально посредством измерения в жидкости с известным удельным электрическим сопротивлением.

Известно, что потенциал-зонды и градиент-зонды одной длины обладают различным радиусом исследования. По этой причине на пластах-коллекторах показания микроградиент-зонда близки к сопротивлению глинистой корочки  $\rho_k^{M23} \rightarrow \rho_{г.к.}$ , а показания микропотенциал-зонда зависят в основном от сопротивления пород в пределах промытой зоны ( $\rho_{п.з.}$ ). Так как  $\rho_{г.к.} < \rho_{п.з.}$ , то против пластов-коллекторов отмечается положительное приращение:

$$\Delta\rho_k = \rho_k^{МНЗ} - \rho_k^{МЗЗ} > 0. \quad (1.5)$$

В пластах глины зона проникновения бурового раствора отсутствует, поэтому показание микроградиент-зонда и микропотенциал-зонда имеют близкие значения и равны удельному электрическому сопротивлению глин:

$$\rho_k^{МНЗ} \approx \rho_k^{МЗЗ}. \quad (1.6)$$

В плотных карбонатных породах также отсутствует зона проникновения. Однако из-за различия удельного электрического сопротивления карбонатных пород и бурового раствора даже незначительные трещины и неоднородности на стенках скважины оказывают влияние на показания зондов микрокаротажа. В результате обе кривые имеют изрезанную форму и многочисленные взаимные пересечения.

Указанные выше признаки позволяют по диаграммам микрозондов дифференцировать песчано-глинистый разрез и выделять пласты-коллекторы. Границы пластов по микрозондам определяются так же, как в методе КС для соответствующих типов зондов и пластов.

Следует отметить, что при наличии на пластах-коллекторах глинистой корки большой толщины (более 1,5 см), микропотенциал-зонд и микроградиент-зонд дают близкие показания. В таких случаях необходимо прибегать к другим методам, таким как БКЗ или боковой микрокаротаж (МБК).

### ***Боковой микрокаротаж (МБК).***

Под боковым микрокаротажом (МБК) понимают микрокаротаж зондами с фокусировкой тока. На практике нашли применение четырёхэлектродный, трёхэлектродный и двухэлектродный боковые микрозонды (рис.1.7, а). Их электроды, как и у обычных микрозондов, размещены на прижимном резиновом "башмаке". Для измерения  $\rho_k$  обеспечивается одинаковый потенциал между электродами  $M$  и  $N$  при помощи регулирования силы тока через центральный электрод. Величину  $\rho_k$  определяют по отношению разности потенциалов между электродом  $M$  ( $N$ ) и удаленным измерительным электродом к току через центральный электрод. Коэффициенты боковых микрозондов определяют экспериментально.

Из-за малых расстояний между электродами зонды бокового микрокаротажа обладают небольшим радиусом исследования. Однако благодаря наличию экранного электрода  $A_э$ , ток из электрода  $A_0$  распространяется непосредственно в исследуемый пласт (рис. 1.7, б). Интерпретация диаграмм бокового микрокаротажа заключается в оценке удельного сопротивления промытой части пласта  $\rho_{п.п.}$ . В карбонатном разрезе по характеру кривой сопротивления  $\rho_{к.МБК}$  различают плотные и трещиноватые породы.

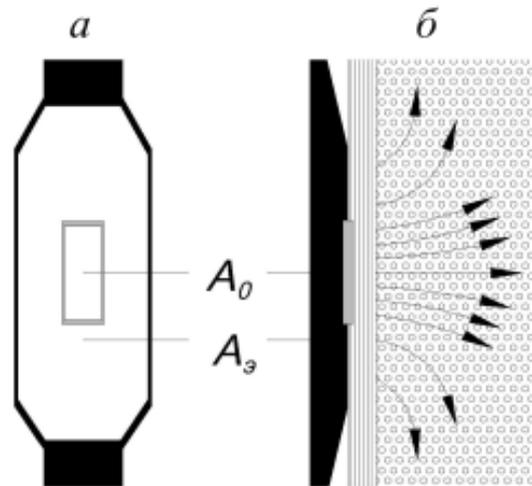


Рис. 1.7. Двухэлектродный микрозонд бокового каротажа (а) и характер распределения токовых линий (б) [25].

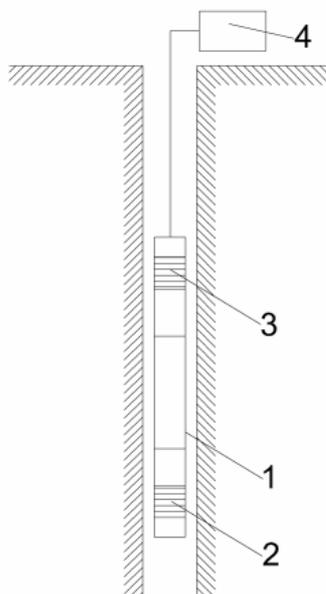
Следует отметить, что благодаря фокусировке ток из центрального электрода  $A_0$  зонда бокового микрокаротажа пересекает глинистую корку по кратчайшему пути и, тем самым, уменьшается её влияние. В отличие от обычных микрозондов на показания МБК промывочная жидкость с низким удельным электрическим сопротивлением оказывает незначительное влияние, поэтому метод получил широкое применение при исследовании скважин, пробуренных на высокоминерализованной промывочной жидкости.

### ***Индукционный картаж (ИК)***

Индукционный картаж (ИК) относится к электромагнитным методам геофизических исследований скважин, он основан на определении кажущейся удельной электрической проводимости горных пород. Индукционный картаж, в отличие от каротажа обычными зондами и бокового, может проводиться не

только в скважинах, заполненных проводящей промывочной жидкостью, но и в скважинах с непроводящей жидкостью (нефтью или на нефтяной основе), воздухом или газом.

В простейшем случае зонд индукционного каротажа имеет в своем составе только две катушки – излучающую и приёмную (рис. 1.8). При пропускании через излучающую катушку переменного тока, вокруг катушки и в окружающей среде создается первичное переменное магнитное поле. В свою очередь, это поле, создает в окружающей среде переменное электрическое поле, поддерживающее вихревые токи, плотность которых растёт с увеличением удельной электропроводности среды. Вихревые токи в породах создают вторичное магнитное поле. Первичное и вторичное переменные магнитные поля индуцируют ЭДС в приёмной катушке. Индуцированная первичным полем ЭДС является помехой, для её устранения в цепь вводится компенсирующая катушка с равной ЭДС и противоположной по фазе.



**Рис. 1.8. Принципиальная схема индукционного каротажа.**

1 – корпус зонда, 2 – излучающая катушка, 3 – приёмная катушка, 4 – регистрирующий прибор

Применяемые на практике зонды индукционного каротажа включают в себя систему излучающих (генераторных) и приёмных (измерительных) катушек, обладающих большой индуктивностью. Система катушек, помимо излучения и измерения электромагнитного поля, обеспечивает его

фокусирование для увеличения радиуса исследования, компенсацию прямых электромагнитных наводок в приёмной катушке, а также позволяет одновременно проводить измерения двумя зондами разной длины.

В однородной изотропной среде с низкой удельной электропроводностью  $\sigma_{\text{п}}$  и при небольших частотах электромагнитного поля (применяемых в индукционных зондах), влиянием взаимодействия вихревых токов можно пренебречь. При этих условиях ЭДС  $E$ , наведённая вторичным магнитным полем в измерительной катушке, определяет следующее выражение:

$$E = k_u \sigma_{\text{п}}, \quad (1.7)$$

где  $\sigma_{\text{п}} = 1/\rho_{\text{п}}$  – электропроводность горных пород,  $k_u$  – коэффициент зонда индукционного каротажа.

В условиях измерений в скважине, среда окружающая зонд, неоднородна (прослой пород разного удельного сопротивления, буровой раствор, наличие зоны проникновения), поэтому полученная в результате измерений величина электропроводности характеризует кажущуюся удельную электропроводность  $\sigma_{\text{к}}$ , по аналогии с каротажем сопротивлений. Поэтому фактически измеряемое в приёмной катушке напряжение электрического поля (сигнал)  $E_c$  пропорционально  $E$ , но отличается от него:

$$E_c = CE, \quad (1.8)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Из выражений (1.7) и (1.8) получаем:

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{E}{k_u} = \frac{E_c}{Ck_u} = \frac{E_c}{k_c}, \quad (1.9)$$

где  $k_c$  – коэффициент для перехода от величины  $E_c$  к  $\sigma_{\text{к}}$ .

Величину коэффициента  $k_c$  выбирают так, чтобы в однородной среде  $\sigma_{\text{к}}$  была равна  $\sigma_{\text{п}}$ .

Основное преимущество метода ИК (по сравнению с методами КС) состоит в отсутствии необходимости в прямом электрическом контакте между зондом и горной породой. Благодаря этому индукционный каротаж можно

применять в скважинах, заполненных непроводящим буровым раствором на нефтяной основе. Также по диаграммам индукционного каротажа можно более точно определить удельное электрическое сопротивление водоносных коллекторов и положение водонефтяного контакта, а значительный радиус исследования даёт возможность получить истинное удельное сопротивление пластов.

Из недостатков ИК следует отметить ограниченную область применения (удельные электрические сопротивления горных пород от десятых долей Ом·м до 50 Ом·м). Поэтому метод индукционного каротажа при широких пределах изменения  $\rho$  горных пород всегда применяют в комплексе с другими методами.

### ***Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ)***

Метод ВИКИЗ применяют для решения следующих задач:

- расчленения разреза вскрытого скважиной;
- оценки положения водонефтяных и газоводяных контактов;
- определения удельного электрического сопротивления зоны проникновения бурового раствора и неизменной части пласта и;
- выделения и оценки параметров радиальных неоднородностей в области проникновения.

Метод был разработан в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения РАН. Методика проведения ВИКИЗ имеет сходство с боковым каротажным зондированием (БКЗ). В методе ВИКИЗ применяются трёхкатушечные индукционные зонды разной длины, состоящие из одной генераторной и двух измерительных катушек, расположенных по одну сторону от генераторной катушки. Зонды обладают геометрическим и электродинамическим подобием. В основе метода лежит принцип частотно-геометрического зондирования, в котором увеличение глубины исследований достигается, во-первых, за счет уменьшения частоты электромагнитного поля (от 14 МГц до 800 кГц) и, во-вторых, за счет увеличения длины зонда  $L$  ( $L=0,5$ ;

0,7; 1,0; 1,4; 2,0 м), таким образом, чем больше длина  $L$  зонда ВИКИЗ, тем ниже рабочая частота.

В отличие от трёхкатушечных зондов индукционного каротажа, в которых измеряют абсолютные значения сигналов на фоне скомпенсированного первичного поля, метод ВИКИЗ базируется на измерении разности фаз  $\Delta\varphi$  гармонически меняющихся сигналов в измерительных катушках. Разность фаз  $\Delta\varphi$  зависит от удельного электрического сопротивления окружающей скважину среды.

Показания коротких зондов ВИКИЗ зависят, в основном, от удельного электрического сопротивления зоны проникновения  $\rho_{зп}=1/\sigma_{зп}$ . Значения  $\rho_k$  длинных зондов ВИКИЗ позволяют получить информацию о величине неизменённой части пласта. Для обработки данных ВИКИЗ разработаны компьютерные программы.

Приведенный обзор показывает, что не один из перечисленных методов каротаж полностью не решает задачу определения поперечного удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии пройденных скважиной горных пород.

### **1.3. Проблема определения параметров электрической анизотропии горных пород при геофизических исследованиях скважин.**

Электрическая анизотропия горных пород оказывает существенное влияние на результаты геофизических исследований скважин, поэтому в последнее время среди иностранных геофизических компаний наблюдается повышенный интерес к возможности её определения [88, 108].

Простейшей анизотропной средой является одноосно-анизотропная среда, она характерна для слоистых горных пород. Как уже было отмечено ранее, удельное электрическое сопротивление такой среды характеризуют два значения: поперечное удельное электрическое сопротивление  $\rho_n$  по оси анизотропии  $n$  (ориентированной по нормали к напластованию пород) и

продольное удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$  по любому ортогональному оси  $n$  направлению  $t$ .

Соотношение между удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_t$  и  $\rho_n$  характеризует коэффициент анизотропии  $\lambda$ :

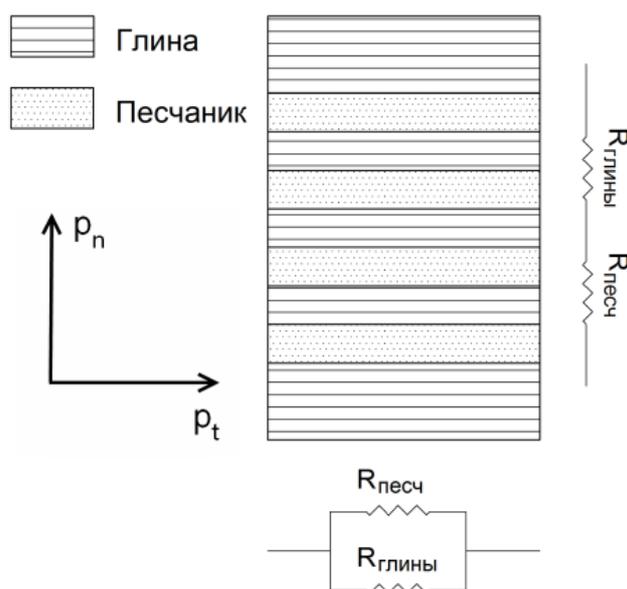
$$\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t} \quad (1.10)$$

Сложности в определении параметров электрической анизотропии горных пород при каротаже заключается в том, что применяемые на практике методы электрометрии, входящие в состав обязательных и детализационных комплексов геофизических исследований скважин, не всегда предоставляют необходимое количество информации, в первую очередь – о значении поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n$ . Так как показания применяемых на практике электрических и электромагнитных методов каротажа (каротаж КС с градиент-зондами и потенциал-зондами, ИК, ВИКИЗ и др.) в вертикальной скважине при субгоризонтальном залегании анизотропных пластов-коллекторов, зависят, в основном, от параметра  $\rho_t$ .

В частности, Ю.А. Дашевский и Л.А. Табаровский в своей работе [22] установили, что среди традиционных технологий электрического каротажа только метод БКЗ позволяет получать информацию о поперечном удельном электрическом сопротивлении пластов. Однако в процессе зондирования при увеличении длины зонда происходит потеря чувствительности измеряемого сигнала к величине поперечного сопротивления, и кажущееся сопротивление стремится к значению, равному продольному сопротивлению  $\rho_t$  (парадокс анизотропии) [19, 90]. Напомним, что парадокс анизотропии заключается в несоответствии характера изменений, кажущихся и истинных удельных сопротивлений в анизотропной среде при применении электроразведочных установок или зондов каротажа КС с токовыми и измерительными электродами. В тонкослоистой анизотропной среде её истинное продольное удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$  всегда меньше, чем поперечное сопротивление  $\rho_n$ . Кажущееся же удельное сопротивление  $\rho_k$  при ориентации

линейной электроразведочной установки, либо трёхэлектродного зонда каротажа КС по напластованию прослоев – больше, чем значение  $\rho_k$  в случае, если такие установки или зонды ориентированы по оси анизотропии  $n$  (по нормали к напластованию).

Вместе с тем для определения характера насыщения анизотропных пластов-коллекторов, параметр  $\rho_n$  является более информативным, чем  $\rho_t$ . В качестве примера, подтверждающего значимость определения параметра  $\rho_n$ , можно привести песчано-глинистый тонкослоистый коллектор, определение типа насыщения в котором является сложной задачей [61, 19]. Коллектор такого типа представляет собой частое чередование проницаемых прослоев нефтенасыщенного или газонасыщенного песчаника (или алевролита) и глинистых непроницаемых прослоев (рис. 1.9).



**Рис. 1.9.** Схематичное представление песчано-глинистого коллектора.

Такое строение коллектора характерно для многих месторождений [7, 55]. Продольному удельному электрическому сопротивлению  $\rho_t$ , которое в большей степени оказывает влияние на показания применяемых методов электрметрии скважин, можно поставить в соответствие модель из параллельно соединённых резисторов (рис. 1.9). При этом основной вклад в измерение  $\rho_t$  будет вносить наименьшее сопротивление  $R_{\text{глины}}$ . В свою очередь, измерение поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n$  будет соответствовать случаю

последовательно соединенных резисторов (рис. 1.9), и основной вклад будет вносить наибольшее сопротивление  $R_{\text{песч}}$ , соответствующее прослоям коллектора, содержащим углеводороды. Таким образом, глинистые прослойки низкого удельного электрического сопротивления в рассмотренном примере будут создавать шунтирующий эффект при измерении  $\rho_t$ , поэтому на основании применяемых на практике методов электротометрии невозможно будет однозначно оценить характер насыщения коллектора.

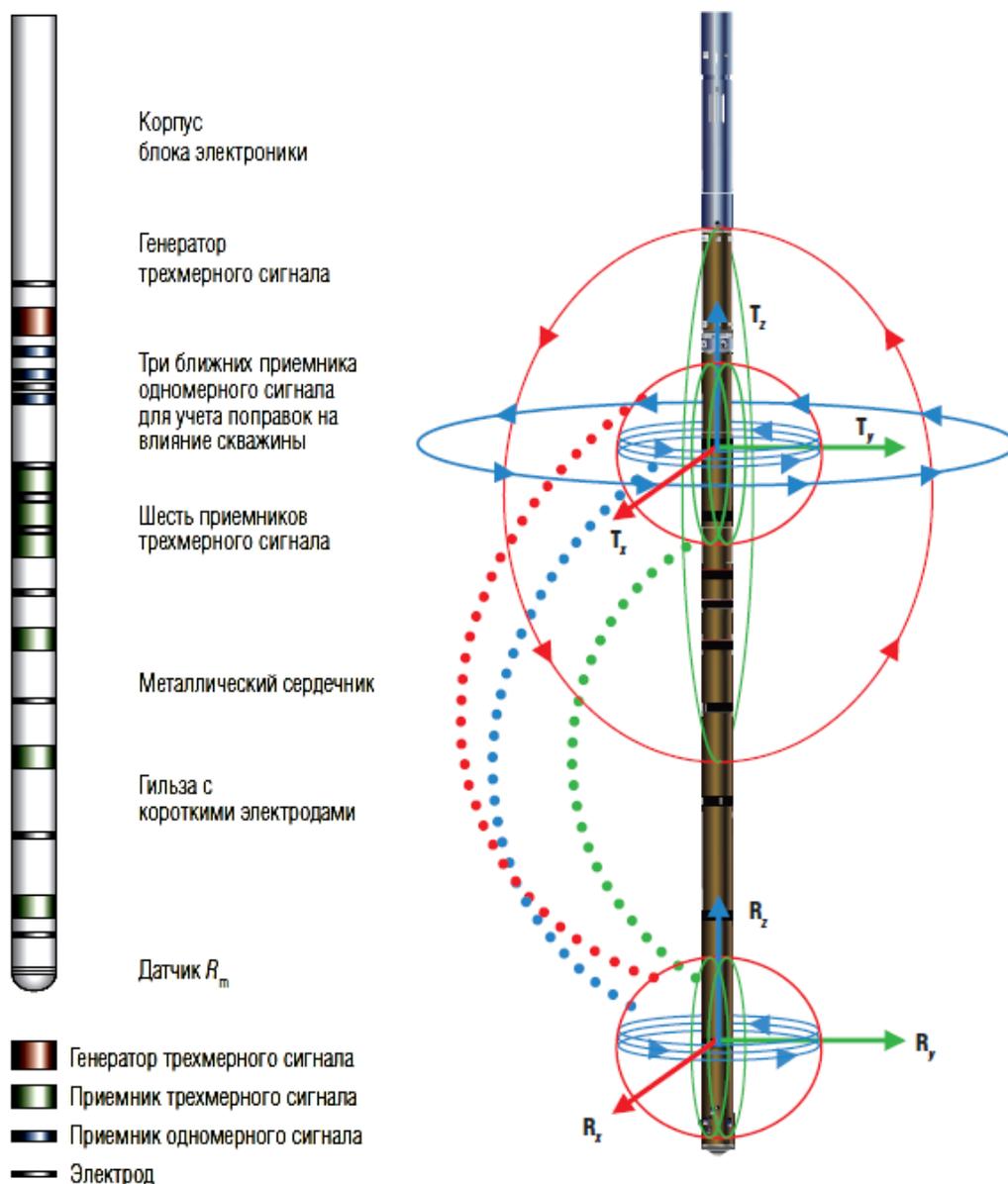
Из рассмотренного примера можно сделать вывод, что определение поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n$  и коэффициента анизотропии  $\lambda$  пластов-коллекторов в некоторых случаях позволит повысить точность определения типа насыщения тонкослоистых коллекторов и получить дополнительную информацию о таких пластах.

Одним из первых, кто рассмотрел проблему определения поперечного удельного сопротивления  $\rho_n$ , был И.Е. Эйдман, получивший в 1970 г. патент на изобретение индукционного каротажа поперечной проводимости [76]. В дальнейшем эта проблема была затронута в работах многих ученых, среди которых Л.М. Альпин [1, 3, 4], А.Д. Каринский [28, 33], Ю.А. Дашевский [19, 21] и др.

Возможные решения проблемы определения электрической анизотропии отражены в многочисленных патентах на изобретения [78, 88, 89, 102, 108]. На сегодняшний день одной из последних разработок в области определения параметров анизотропии горных пород по удельному электрическому сопротивлению можно считать зонд трёхмерного индукционного зондирования Rt Scanner (рис. 1.10), разработанный фирмой «Шлюмберже» [7].

Зонд трёхмерного индукционного зондирования Rt Scanner состоит из генератора трёхмерного сигнала, трёх ближних приёмников для ввода поправок на влияние скважины и шести приёмников трёхмерного сигнала. Для определения указанных поправок также применяются электроды на приборе и датчик УЭС бурового раствора  $R_m$  (рис. 1.10). В "традиционном" индукционном каротаже ось генераторных катушек совпадает с осью прибора (ось Z). В зонде

трёхмерного индукционного каротажа дополнительно включены катушки, оси которых совпадают с осями  $X$  и  $Y$ .



**Рис. 1.10. Прибор трёхмерного индукционного зондирования Rt Scanner [7]**

Принцип измерения заключается в том, что катушка, генерирующая трёхмерный сигнал, имеет три магнитных момента, направленных по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Сигнал регистрируют группы приёмников, расположенных на разных расстояниях от генераторной катушки, это обеспечивает различный радиус исследования. Результаты обработки данных трёхмерного индукционного зондирования позволяют определить анизотропию удельного электрического сопротивления, положение границ пластов и угол падения этих границ.

Разработка зонда и методики интерпретации трёхмерного каротажа потребовала применения значительных вычислительных мощностей и привлечения многих ученых.

В результате можно сделать вывод о том, что разработка методов ГИС, по результатам которых можно определить значения  $\rho_n$  или  $\lambda$ , пройденных скважиной пластов, является важной и актуальной задачей, решение которой позволит повысить качество и точность определения параметров пластов при поисках и разведке месторождений углеводородов.

#### 1.4. Применение зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов при геофизических исследованиях скважин.

В методах сопротивления электроразведки применяют различные установки, в том числе и дипольные, которые состоят из питающего и приёмного электрических диполей. Различают дипольно-осевые и дипольно-экваториальные установки (рис. 1.11). Возможность применения таких установок при электрических зондированиях была обоснована в работах Л.М. Альпина [2, 5].

Установка дипольно-осевая



Установка дипольно-экваториальная



Рис. 1.11. Типы дипольных установок.

По расположению питающих и измерительных электродов дипольные зонды схожи с дипольными установками, применяемыми в электроразведке. Идея применения дипольных зондов для каротажа скважин была выдвинута давно, но широкое распространение она не получила. В частности, В.Н. Дахнов указывал на высокую расчленяющую способность дипольно-осевых зондов и на их недостаточную изученность [17]. Одной из возможных причин, по

которой дипольные зонды не нашли широкого применения, можно считать сложности в технической реализации каротажа такими зондами. Для проведения каротажа дипольными зондами необходимо, чтобы в скважине располагались четыре электрода, а стандартный каротажный кабель содержал в себе только три жилы. Другими словами, для проведения каротажа дипольным зондом необходимо было применять четырёхжильный кабель, а это могло вызывать определенные сложности в проведении работ.

Среди исследований по изучению возможности применения дипольных зондов следует выделить работу Ю.А. Дашевского [19]. В ней автор приводит результаты математического моделирования и физического эксперимента для "гальванического зонда", который по расположению электродов соответствует дипольно-экваториальному зонду. Остановимся подробнее на рассмотрении физического эксперимента, приведенного в этой работе [19]. Физическая модель состояла из бака, в центральной части которого пробурена скважина диаметром 0,13 м и глубиной 4 м. Дно и стенки бака покрыты слоем бетона толщиной 0,2 м [19]. Стенки бетона покрыты слоем гидроизоляции [19]. На дне бака у устья скважины выложена бетонная воронка [19]. Скважина и бак заполнены электролитом [19]. Толщина слоя электролита в баке – 1,94 м [19].

При создании макета зонда в качестве непроводящего корпуса был применен отрезок трубы из стеклопластика диаметром 0,077 м и длиной 2 м [19]. На расстоянии 0,6 м от края трубы были размещены токовые электроды диаметром 0,01 м [19]. На расстояниях 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 м от генераторного устройства установлены пары измерительных электродов [19].

В качестве измерительных средств использовался комплект стандартной электроразведочной аппаратуры АНЧ – 3 (рабочая частота 4,88 Гц) [19]. В процессе эксперимента генераторный и измерительный блоки прибора размещались на крышке бака и соединялись с электродами зонда при помощи проводов [19]. Взаимное влияние проводов и высокий уровень электромагнитных помех осложняли процесс измерений [19]. Поэтому, в качестве кондиционных данных, пригодных для дальнейшей обработки,

автором работы были выбраны результаты измерений для зондов длиной 0,1; 0,2; 0,4 м [19].

Процесс измерений происходил следующим образом. Перед началом измерений зонд опускался на забой скважины [19]. При помощи ручной лебедки конструкция перемещалась вверх с шагом 0,1 м [19]. После паузы в 10 с. производились измерения [19]. Далее процесс повторялся.

Результаты измерений представлены на рис. 1.12 в виде диаграмм зондов различной длины в зависимости от координаты генератора зонда (на рисунке результаты эксперимента показаны сплошными линиями). В заключении автор указывает на совпадение результатов эксперимента и математического моделирования [19].

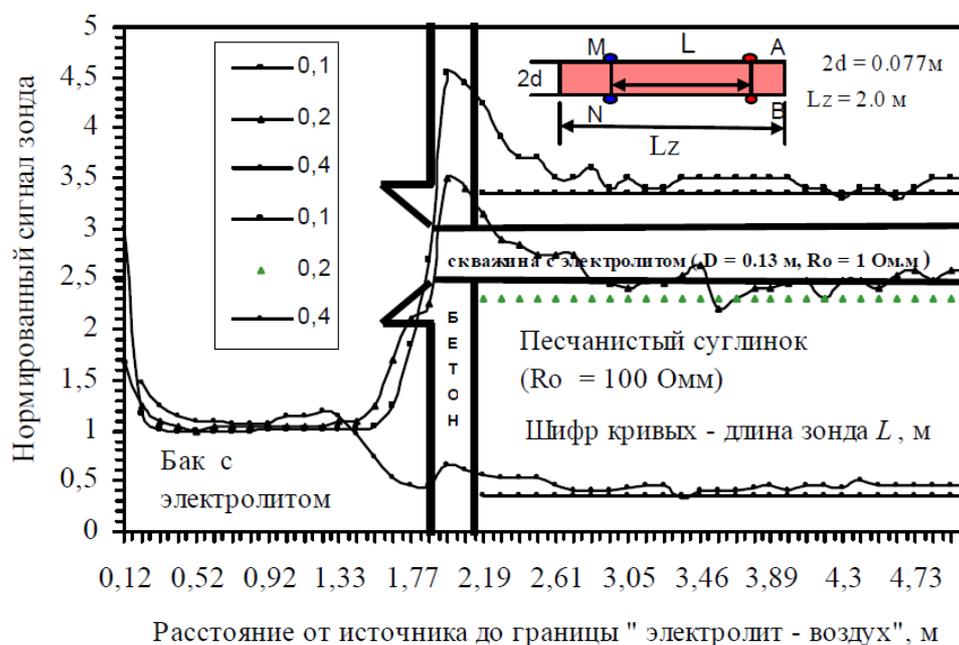
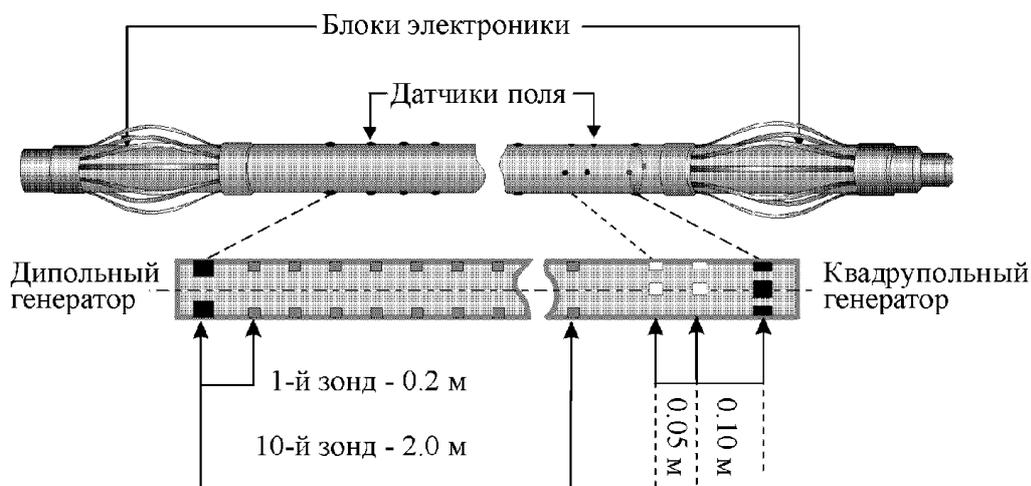


Рис. 1.12. Экспериментальные диаграммы гальванических зондов [19].

Из подробного рассмотрения этих исследований [19], можно сделать следующие выводы. Во-первых, интерес к изучению дипольно-экваториальных зондов, подтверждает актуальность диссертационного исследования. Во-вторых, ученые проводившие физические эксперименты [19], столкнулись с проблемой влияния электромагнитных помех на результаты измерений, которая в свою очередь являлась основной при проведении лабораторного

моделирования зондов с тороидальными антеннами, тем самым подтверждая сложность проведения последних.

Из современных аппаратных разработок, связанных с применением дипольных зондов при каротаже, можно отметить созданный в ФГБУН Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН зонд постоянного тока с неосесимметричным возбуждением для исследования изотропных и анизотропных разрезов [21]. На рис. 1.13. приведена схема этого зонда.



**Рис. 1.13. Схема зондовой части аппаратно-программного комплекса неосесимметричных зондов постоянного тока [21]**

Зонд содержит одну пару токовых и десять пар приёмных электродов. Все электроды расположены по двум образующим непроводящего цилиндрического корпуса. Зонд по расположению питающих и приёмных электродов схож с дипольно-экваториальным зондом, лабораторное моделирование которого рассмотрено в данной работе.

В исследованиях, связанных с применением тороидальных антенн для геофизических исследований скважин, принимали участие многие ученые из крупнейших иностранных геофизических компании таких как Halliburton [79, 82, 89, 92, 105], Baker Hughes [98, 99, 100], Schlumberger [80, 81, 83, 84, 85, 88, 102, 108] и др [78, 97, 103, 107]. При помощи тороидальных антенн решают обширный спектр задач. В качестве примера приведем метод измерения электрической анизотропии горных пород, окружающих ствол скважины,

патент на изобретение которого получил Stanley C. Gianzero [89]. На рис. 1.14 приведена схема зонда с тороидальными антеннами для каротажа в процессе бурения.

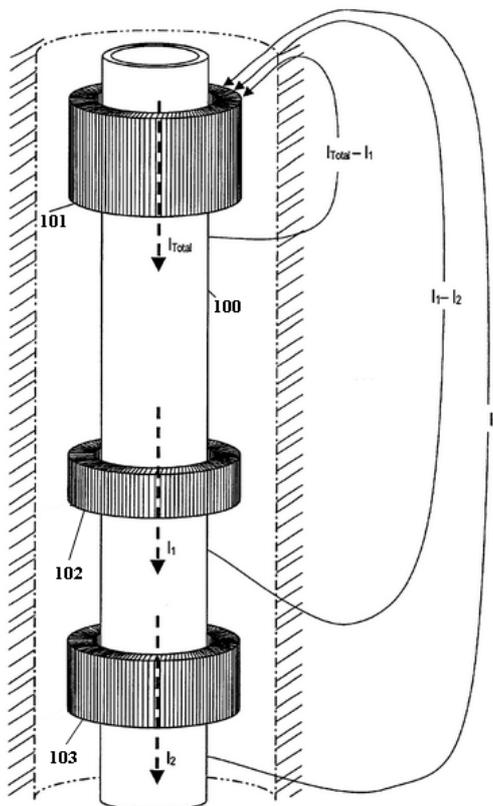


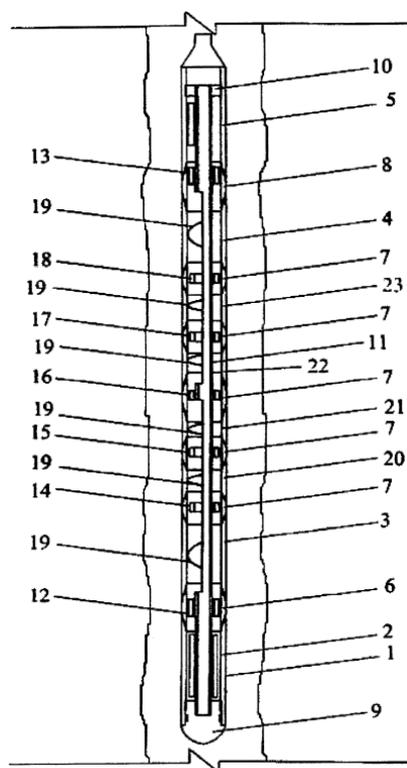
Рис. 1.14. Схема каротажного зонда [89].

На этом рисунке 100 – буровая колонна, 101 – передающая тороидальная антенна, 102 и 103 – приёмные тороидальные антенны

Сущность метода заключается в том, что питаемая переменным током передающая тороидальная антенна (106) создает переменное магнитное поле в сердечнике, который в свою очередь индуцирует ток  $I_{общий}$  в буровой колонне (100) и окружающих скважину горных породах, при этом измеряется разность сигналов в приемных тороидальных антеннах (102) и (103). В результате измерений получают величину кажущейся поперечной удельной проводимости горных пород, а, зная величину продольной проводимости, можно вычислить коэффициент анизотропии.

Исследованию возможности применения тороидальных антенн при геофизических исследованиях скважин посвящены многочисленные работы А. Д. Каринского [30,31,32,37,38,94,95,96]. Среди отечественных аппаратурных

разработок в этом направлении рассмотрим устройство для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород, патент на изобретение которого получили А.К. Манштейн, В.Н. Глинских, В.Н. Еремин, А.Н. Петров, М.И. Эпов [52]. Схема устройства приведена на рис. 1.15.



**Рис. 1.15.** Схема устройства для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород [52].

Устройство включает в себя следующие элементы (Рис. 1.15): корпус 1, стержень 11, генераторные катушки 12, 13, приёмные катушки 14, 15, 16, 17, 18. Многосекционный корпус 1 устройства состоит из немагнитных проводящих секций 2, 3, 4, 5, 20, 21, 22, 23, непроводящих вставок 6, 7, 8 между проводящими секциями, немагнитного металлического стержня 11 с закрепленными на нем генераторными и приемными катушками. Генераторная катушка 12 расположена на стержне 11 между проводящими секциями 2 и 3 (в нижней части устройства) внутри непроводящей вставки 6. Генераторная катушка 13 расположена на стержне 11 между проводящими секциями 4 и 5 (в верхней части устройства) внутри непроводящей вставки 8. Приёмные катушки 14, 15, 16, 17, 18 расположены на стержне 11 между проводящими секциями 3,

20, 21, 22, 23, 4 и разделены непроводящими вставками 7. Приёмная катушка 16 размещена на заданном расстоянии от генераторных катушек 12, 13. Приёмные катушки 14, 15 расположены симметрично катушкам 17, 18 относительно катушки 16. Внутри корпуса 1 размещён генератор сигнала, блок измерительной аппаратуры и блок управления и передачи данных (эти элементы не отображены на рис. 1.15) [52].

Приведённое на рис. 1.15 устройство работает следующим образом. На обмотку генераторных катушек 12 и 13 подаётся переменный электрический ток с генератора сигналов, посредством чего в окружающей среде возбуждается переменное магнитное поле которое в свою очередь возбуждает вихревое электрическое поле и токи. Блок измерительной аппаратуры (которые не показан на рис. 1.15) измеряет электрический ток в приёмных катушках 14, 16, 18 и ЭДС в катушках 15, 17 [52]. В приёмных тороидальных катушках 15, 17 измеряют реальные и мнимые составляющие ЭДС. В свою очередь в катушках 14, 16, 18 измеряется реальная и мнимая составляющие параллельной корпусу компоненты плотности вихревого тока [52]. Благодаря высокой электропроводности металла последняя будет значительной даже при невысоких значениях моментов генераторных катушек [52]. При этом регистрируемые в приёмных тороидальных катушках сигналы будут зависеть не только от горизонтальной, но и от вертикальной удельной электрической проводимости, пересекаемого скважиной пласта [52].

Кроме определения параметров анизотропии горных пород, тороидальные антенны применяются в методе электромагнитного исследования горных пород за обсадной колонной [77] и каротаже в процессе бурения скважин [98, 99, 100]. Среди приборов, не связанных с геофизическими исследованиями скважин, тороидальные антенны нашли применение в устройствах приема скважиной информации [12, 23].

Из приведённого обзора можно сделать вывод о том, что изучение возможности применения тороидальных антенн и дипольных зондов при геофизических исследованиях скважин актуально и в настоящее время.

## **Выводы.**

1. Для определения удельного электрического сопротивления  $\rho$  (или удельной электропроводности  $\sigma = 1/\rho$ ) пройденных скважиной горных пород при общих и детальном геофизических исследованиях применяют следующие методы: кажущегося сопротивления (КС), боковое каротажное зондирование (БКЗ), боковой каротаж (БК), микрокаротаж (МК), боковой микрокаротаж, индукционный каротаж (ИК).

2. Многие горные породы (в том числе некоторые типы пластов-коллекторов) электрически анизотропны. Удельное электрическое сопротивление таких пород характеризуют параметры  $\rho_n$  и  $\rho_t$ , а также – коэффициент анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t}$ . Параметры электрической анизотропии  $\rho_n$  и  $\rho_t$  содержат важную информацию о строении и свойствах анизотропных пород, так как эти параметры по-разному зависят от характера насыщения пород, их фильтрационных свойств и других факторов.

3. При типичном в условиях платформ субгоризонтальном залегании пластов и прослоев, слагающих терригенные осадочные породы-коллекторы, результаты применяемых электрических и электромагнитных методов геофизических исследований скважин в вертикальных скважинах зависят, в основном, от параметра  $\rho_t$ . Поэтому в последние годы проводилась разработка новых типов зондов, позволяющих определить не только  $\rho_t$ , но и  $\rho_n$  или коэффициент анизотропии  $\lambda$ . Этой же проблеме посвящены результаты исследований, представленные в диссертационной работе.

4. Дипольные зонды и зонды с тороидальными антеннами не получили широкого распространения при каротаже. Однако постоянно растущий интерес к этим типам зондов свидетельствует об их перспективности для решения задач геофизических исследований скважин. Поэтому проведение лабораторного и математического моделирования дипольных зондов и зондов с тороидальными антеннами является актуальным научным направлением.

## Глава 2. Лабораторное моделирование зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.

### 2.1. Лабораторные установки, применённые при физическом моделировании.

Для физического моделирования были созданы несколько лабораторных установок, которые включали в себя модели пересечённых скважиной анизотропных, либо изотропных пластов и макеты зондов электрического и электромагнитного каротажа, которые (судя по результатам проведённых ранее теоретических исследований) могут быть перспективны при изучении параметров электрической анизотропии пройденных скважиной горных пород. Схематично лабораторные установки для различных типов зондов представлены на рис. 2.1.

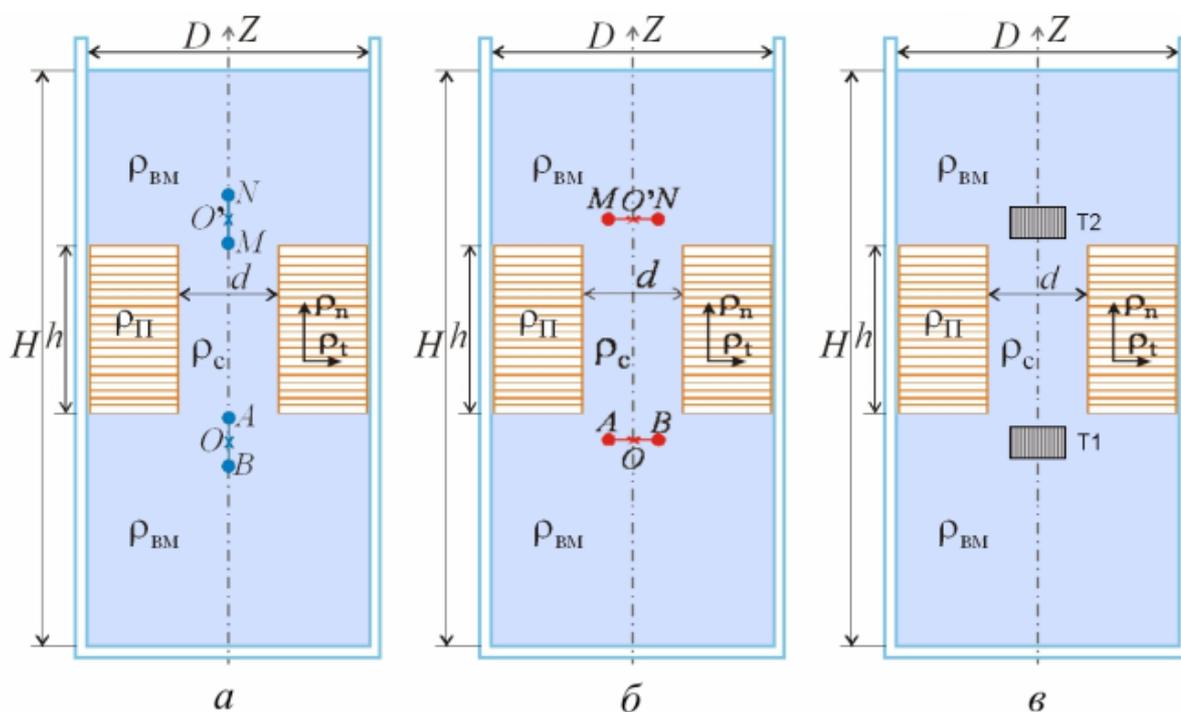


Рис. 2.1. Схема установок для лабораторного моделирования дипольно-осевого зонда (а), дипольно-экваториального (б) и зонда с тороидальными антеннами (в).

На этом рисунке  $D$  – диаметр модели среды,  $d$  – диаметр модели скважины,  $H$  – высота модели среды,  $h$  – высота (мощность) модели пласта,  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление скважины,  $\rho_n$  – удельное электрическое сопротивление пласта,  $\rho_{BM}$  – удельное электрическое сопротивление вмещающих пород,  $Z$  – ось симметрии модели среды

Приведём данные о моделях среды и макетах зондов, применённых при лабораторном моделировании.

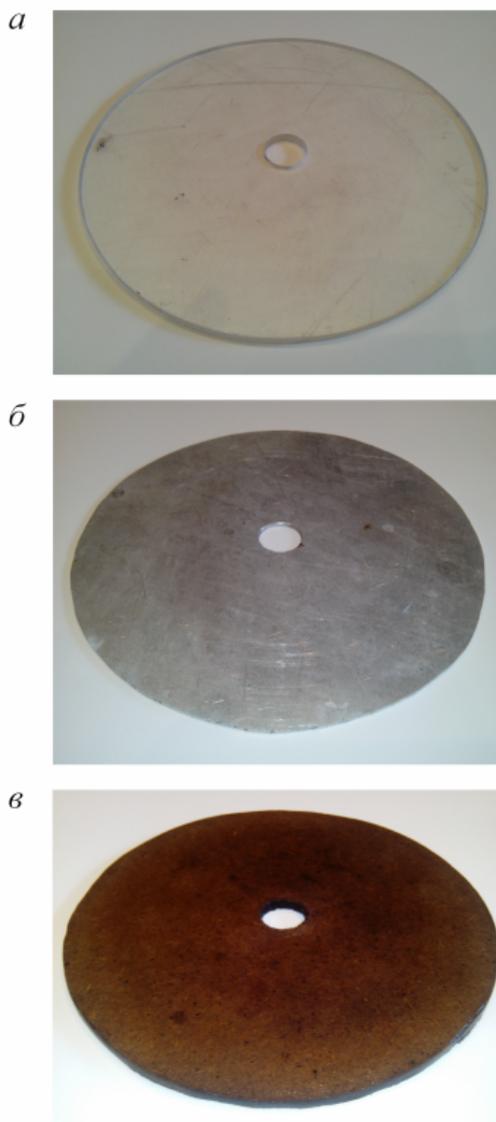
### ***Лабораторная модель среды***

Лабораторные модели среды состояли из моделей пласта (на рис. 2.1 показаны коричневым цветом), а также моделей вмещающих пласт пород и модели скважины (на рис. 2.1 показаны голубым цветом). Модели среды имели форму прямых круговых цилиндров, ограниченных слоем оргстекла, либо воздуха (в верхних частях моделей). Цилиндры, заполненные водными растворами соли (водой) соответствовали модели вмещающих пласт пород. В средней части лабораторной модели среды была расположена модель пройденного скважиной пласта. Внешний радиус модели пласта и вмещающих пород был равен ограничивающему модель среды в радиальном направлении изолятору, а внутренний - радиусу модели скважины.

Для лабораторных моделей среды были изготовлены модели изотропных пластов, либо анизотропных пластов из чередующихся тонких слоёв материалов с разным удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . При изготовлении моделей пластов были применены такие материалы как картон, оргстекло, алюминий. Такой выбор был сделан на основании следующих свойств этих материалов. Во-первых, все перечисленные выше типы материалов просты в обработке; это, в свою очередь, снижало затраты времени на изготовление модели пласта. Во-вторых, они различаются по удельному электрическому сопротивлению. В-третьих, эти материалы не подвержены деформации или разрушению в результате (непродолжительного) взаимодействия с водой. Это свойство особенно важно, так как в качестве модели вмещающих пласт пород был применён водный раствор солей. Отметим, что на первых этапах лабораторного моделирования предполагалось, что картон однороден и изотропен, однако в последующем экспериментально были установлены его анизотропные свойства.

Слои материалов в модели пласта имели форму диска, диаметр которого совпадал с диаметром модели среды  $D$  и был равен 19 см. В центре каждого

диска было отверстие, отвечающее модели скважины диаметром  $d = 2$  см. Для каждого типа материала толщина одного слоя была различной. Так, для картона и оргстекла она составляла 0,5 см, а для алюминия - 0,2 см. Применённые при изготовлении модели пласта слои различных материалов показаны на рис. 2.2.

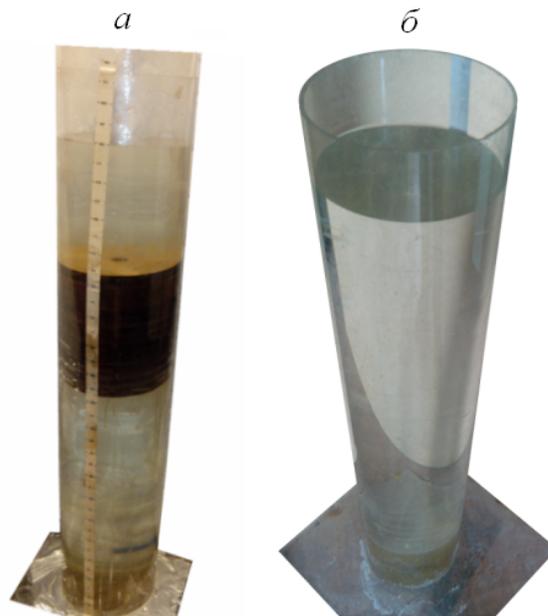


**Рис. 2.2. Примеры применённых при лабораторном моделировании слоёв оргстекла (а), алюминия (б), картона (в).**

При лабораторном моделировании модель пласта, изготовленная из слоёв оргстекла, соответствовала пласту высокого удельного электрического сопротивления. Для моделирования пласта с низким удельным электрическим сопротивлением были применены слои алюминия. Модель пласта, которая состояла из слоев картона (пропитанных водой), соответствовала случаю слабо-анизотропного пласта. Благодаря применению материалов с разным удельным

электрическим сопротивлением и разного количества слоев для целей лабораторного моделирования были изготовлены модели пласта с различными электрическими параметрами.

Одна из моделей среды, применённая при лабораторном моделировании, показана на рис. 2.3, *а*. В этом случае она состояла из модели пласта, представленного чередующимися слоями картона, сверху и снизу ограниченного вмещающими породами (водный раствор солей).



**Рис.2.3. Примеры моделей среды, применённых при лабораторном моделировании.**

*а* – модель среды со слабо-анизотропной моделью пласта,

*б* – модель однородной изотропной среды.

На рис. 2.3, *б* представлена лабораторная модель однородной изотропной среды. Здесь модель пласта соответствует модели вмещающих пород. Такая модель среды была применена для проведения калибровочных измерений и оценки работоспособности изготовленных макетов зондов.

#### ***Макеты зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов***

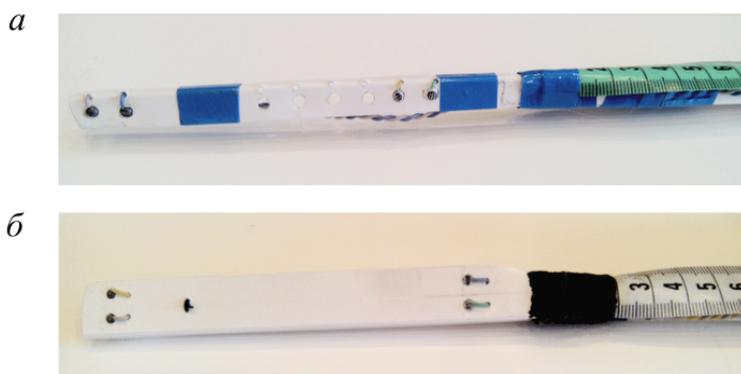
Кроме лабораторных моделей среды были созданы макеты нескольких, имеющих различную конструкцию, зондов электрического и электромагнитного каротажа. Это следующие макеты зондов:

1) "осевой зонд" с тороидальными антеннами (ТОЗ), у которого оси генераторной и измерительной антенн лежат на оси модели среды;

2) дипольно-осевой зонд (ДОЗ) каротажа КС с генераторной линией  $AB$  и измерительной линией  $MN$ , лежащими на оси модели среды;

3) дипольно-экваториальный зонд (ДЭЗ) каротажа КС с генераторной линией  $AB$  и измерительной линией  $MN$ , ортогональными оси модели скважины.

Макеты зондов, примененные при лабораторном моделировании, схематично показаны на рис. 2.1. У дипольных зондов, как и в наземной электроразведке, расстояния между питающими электродами  $A$ ,  $B$  и измерительными электродами  $M$ ,  $N$  много меньше, чем расстояние между центрами отрезков  $AB$  и  $MN$ . Некоторые из макетов дипольных зондов, участвовавшие в лабораторных экспериментах, показаны на рис. 2.4.



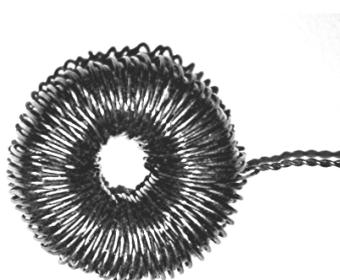
**Рис. 2.4.** Макет дипольно-осевого зонда (а) и дипольно-экваториального зонда (б).

Как можно увидеть на рис. 2.4, макеты дипольно-осевых и дипольно-экваториальных зондов имели схожую конструкцию. Процесс изготовления макета дипольного зонда происходил следующим образом. Вначале был изготовлен каркас, который обеспечивал необходимую прочность конструкции макета зонда. В качестве каркаса была выбрана пластмассовая пластина толщиной 1 мм, для дипольно-осевых зондов её ширина составляла 0,8 - 1 см, в случае дипольно-экваториальных зондов 1,2 - 1,8 см. Длина каркаса зависела от требуемой длины зонда. После изготовления каркаса в него были установлены свинцовые электроды, которые имели форму шара. Все электроды были плотно зафиксированы в каркасе для исключения их перемещения. Электроды при помощи проводов были соединены с измерительной аппаратурой. В качестве

соединительных проводов был применён медный изолированный провод, скрученный в витую пару для снижения влияния электромагнитных помех. Перед началом измерений соединительные провода проходили проверку целостности изоляции. Для удобства позиционирования на каждом макете зонда была расположена измерительная лента.

Макет зонда с тороидальными антеннами состоял из соосных генераторной (Т1) и измерительной (Т2) тороидальных антенн (рис. 2.2, в). Процесс изготовления тороидальной антенны происходил следующим образом. Основой тороидальной антенны являлся ферритовый сердечник в виде кольца. На первом этапе были устранены неровности поверхности ферритового сердечника, которые могли вызвать повреждение изоляции провода обмотки (при необходимости сердечник покрывался слоем лака). После подготовки ферритового сердечника на него равномерно, виток к витку, был намотан провод.

Для исключения утечек в обмотках антенн, вызванных повреждением изоляции, все антенны были покрыты тонким слоем лака. Генераторная и измерительная антенны по своим характеристикам (число витков обмотки, материал сердечника и т.д.) изготавливались идентичными. На рис. 2.5 приведена одна из тороидальных антенн, применённая при экспериментах.



**Рис. 2.5. Пример тороидальной антенны, применённой в макетах зондов.**

*(тороидальная антенна до изолирования слоем лака)*

В целях увеличения прочности макета зонда и во избежание смещения тороидальных антенн относительно оси модели скважины был применён пластмассовый каркас. Конструкция каркаса была аналогична той, что применялась в дипольных зондах.

В качестве соединительных проводов был применён коаксиальный провод. Места соединения обмотки антенны с коаксиальным проводом были изолированы лаком.

При исследованиях были применены различные по характеристикам тороидальные антенны (размер ферритового сердечника, число витков, сечение провода и т.д.).

## 2.2. Аппаратура, применённая при лабораторном моделировании.

В качестве измерительной аппаратуры для экспериментов с дипольными зондами был применён низкочастотный компьютеризированный электроразведочный прибор Электротест С (рис. 2.6). Ниже в таблице 1 приведены основные технические характеристики, указанные в документации к прибору.



Рис. 2.6. Электроразведочный прибор Электротест С.

Область применения:

- определение кажущихся удельных электрических сопротивлений геоэлектрических разрезов методом сопротивлений с установками профилирования и зондирования;
- площадные инженерно-геологические исследования;
- определение характеристик грунтов по их электрической проводимости под основания зданий и сооружений;
- измерение сопротивлений заземлителей;

- обнаружение и прослеживание водопроводных и канализационных магистралей, подземных продуктопроводов, силовых кабелей, линий телефонной и сигнальной связи, в том числе методом заряда;
- определение местоположения нарушений изоляции металлических трубопроводов путем регистрации активности коррозионных процессов;
- поиски и оконтуривание археологических объектов.

**Таблица 1. Технические характеристики электроразведочного прибора Электротест С.**

Параметры	Значения
Рабочие частоты аппаратуры, Гц	0; 0.625; 1.25; 2.5; 5; 10; 20;
Разрешающая способность измерителя, мВ	0.01;
Диапазон выходных токов генераторов, мА	0.5 ÷ 200;
Мощность, Вт	20
Измеритель определяет параметр $q$ , Ом, являющийся отношением значений входного напряжения измерителя к выходному току генератора на рабочей частоте.	
Диапазон определения параметра $q$ , Ом в пределах	$5 \cdot 10^{-3} \div 3.86 \cdot 10^3$
Основная относительная погрешность определения параметра $q$ не более, %	2
Основная относительная погрешность измерения напряжений на частоте 0 Гц при амплитуде входных сигналов не менее 10 мВ не более, %	2
Входное активное сопротивление измерителя, Мом	10
Подавление помех с частотой 50 Гц не менее, дБ	80
Выходное напряжение генератора, не менее, В	250
Встроенная память обеспечивает запись и хранение отсчетов, не менее.	2048
Напряжение питания прибора, В	12
Габариты:	320x250x250 мм
Вес:	Около 5 кг

Для лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами, в качестве регистратора сигнала был применен осциллограф С1 - 65А (рис. 2.7). Ниже в таблице 2 приведены основные технические характеристики, указанные в документации к прибору.

Осциллограф универсальный С1 - 65А предназначен для исследования формы электрических сигналов путём визуального наблюдения и измерения их амплитудных и временных параметров в цеховых, лабораторных и полевых условиях эксплуатации.



Рис. 2.7. Осциллограф С1 - 65А.

Таблица 2. Технические характеристики осциллографа С1 - 65А.

Параметры	Значения
Полоса пропускания	0 – 40 МГц
Количество лучей(каналов) ЭЛТ	Однолучевой
Диапазон измеряемых напряжений	15 мВ – 60 В
Диапазон измеряемых интервалов времени	0,05 мкс – 0,5 сек
Параметры канала Y	
Чувствительность каналов 1 и 2	5 мВ/дел – 10 В/дел
Входное сопротивление канала	1 Мом
Входная емкость канала	30 пф
Параметры канала X	
Длительность развертки минимальная	0,01 мкс/дел
Длительность развертки максимальная	50 мсек/дел
Амплитуда сигналов внешней синхронизации	0,5 – 30 В
Диапазон частот внешней синхронизации	10 Гц – 35 МГц
Входное сопротивление внешней синхронизации	1 Мом
Параметры канала Z	
Диапазон частот канала	20 Гц – 10 МГц
Диапазон входных напряжений	1,5 – 20 В
Входное сопротивление канала	50 кОм
Параметры канала калибровки	
Частота сигнала калибровки	Меандр 1 кГц
Напряжение сигнала калибровки	0,02 – 50 В
Общие	
Погрешность измерения амплитуды сигнала	Не более 5 %
Погрешность измерения интервалов времени	Не более 5 %
Ширина линии луча	0,8 мм
Рабочая площадь экрана по горизонтали	60 мм
Рабочая площадь экрана по вертикали	36 мм
Напряжение питающей сети	220 В 50 Гц 115 В 400 Гц
Потребляемая мощность	125 ВА
Диапазон рабочих температур	-30 + 50 град С
Габаритные размеры	348 x 200 x 502 мм
Масса	16 кг

Для контроля полученных на осциллографе результатов и повышения точности измерений был применен милливольтметр ВЗ - 38 (рис. 2.8), в таблице 3 приведены его основные технические характеристики, указанные в документации к прибору.



Рис. 2.8. Милливольтметр ВЗ-38.

Таблица 3. Технические характеристики милливольтметров серии ВЗ - 38.

Переменное напряжение	Диапазон напряжений		100 мкВ...300 В
	Предел измерения		1 мВ/.../300 В (12 поддиапазонов, шаг 1-3)
	Диапазон частот	Нормальная область	45 Гц...1 МГц
		Рабочие области	20 Гц...45 Гц
			1 МГц...3 МГц
	Погрешность измерения, не более	В диапазонах	
		45 Гц...1 МГц	2.5...4%
20 Гц...45 Гц		4%	
1 МГц...3 МГц		4%	
	3 МГц...5 МГц	6%	
Переменное напряжение	Частота градуировки		
	Входной импеданс	На пределах	
		1 мВ/.../300 мВ	5 МОм / 30 пФ
		1 В/.../300 В	4 МОм / 15 пФ
Дисплей	Тип индикаторов		Стрелочный
Общие данные	Напряжение питания		220 В ±10%, 50 Гц
	Потребляемая мощность		10 В·А
	Габаритные размеры		150×205×300 мм
	Масса		5 кг

Милливольтметр ВЗ - 38 применяется в лабораторных и производственных условиях при разработке и наладке радиотехнической аппаратуры, аппаратуры связи, различных усилителей переменного тока, аппаратуры звуковой записи и воспроизведения, установок ультразвука и т. д.

В качестве генератора сигнала для макетов зондов с тороидальными антеннами был применён генератор сигналов низкочастотный ГЗ - 56/1 (рис.2.9).



**Рис. 2.9. Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-56/1.**

Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-56/1 применяют при регулировке и испытании каскадов радиоаппаратуры в лабораторных и цеховых условиях. Он представляет собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот. Генератор имеет диапазон частот от 20 Гц до 200 кГц и соответствует классу 3 ГОСТ 10501-63 в диапазоне частот от 200 до 20000 Гц, классу 4 в диапазоне частот от 20 до 200 Гц и от 20 до 200 кГц.

Вся применённая при лабораторных измерениях аппаратура перед проведением экспериментов проходила все необходимые предварительные проверки, указанные в инструкциях по эксплуатации соответствующих приборов. Все эксперименты проводились со строгим соблюдением требований техники безопасности.

### **2.3. Методика проведения лабораторного моделирования.**

Лабораторные эксперименты с дипольными зондами проходили следующим образом. Вначале был изготовлен макет зонда с необходимыми параметрами (расположение электродов, длина зонда).

После изготовления макета зонда были проведены калибровочные измерения для оценки его работоспособности и уточнения коэффициента зонда  $k$ , определение которого проблематично при малых расстояниях между электродами. Для проведения калибровочных измерений была выбрана модель

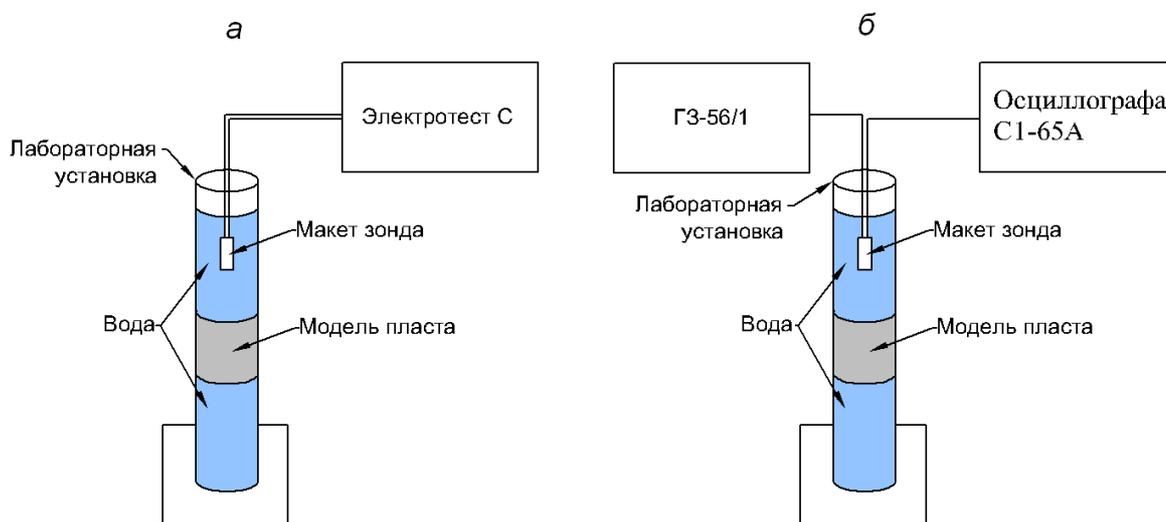
однородной изотропной среды (рис. 2.3, б). В отсутствие электромагнитных помех результаты измерений в такой модели среды не должны существенно различаться по всей её протяженности. Значение удельного электрического сопротивления водного раствора солей перед каждым экспериментом было измерено при помощи резистивиметра.

В качестве измерительной аппаратуры при калибровочных и лабораторных экспериментах с дипольными зондами, был применён электроразведочный прибор Электротест С, который перед началом работы проходил все необходимые проверки. По результатам калибровочных измерений принималось решение о необходимости корректировки макета зонда.

На следующем этапе происходила подготовка лабораторной модели среды. При помощи слоёв различных материалов (или одного материала) была изготовлена модель пласта. Если в состав модели пласта входили слои картона, то перед установкой в модель среды они на некоторое время были помещены в водный раствор солей, температура которого соответствовала температуре окружающей среды. Такая мера была принята для исключения изменения удельного электрического сопротивления картона в результате взаимодействия с водным раствором солей.

Модель пласта была установлена в средней части модели среды. После установки модели пласта лабораторная модель среды была заполнена водным раствором солей. Для исключения изменения удельного электрического сопротивления водного раствора солей в процессе проведения эксперимента, измерения в подготовленной лабораторной модели среды проходили по прошествии некоторого времени (от 1 до 3 часов). В течение этого времени водный раствор солей принимал температуру окружающей среды. Оценка изменения температуры водного раствора солей во время эксперимента осуществлялась при помощи её измерения (термометром). Все эксперименты (в том числе и калибровочные измерения) были проведены при постоянной температуре водного раствора солей.

После подготовки макета зонда и модели среды были проведены измерения, схема проведения которых для дипольных зондов представлена на рис. 2.10, *а*. Для повышения точности результатов измерений записи были проведены как при спуске макета зонда, так и при его подъеме.



**Рис. 2.10. Схема проведения лабораторных измерений:**

***а* – для дипольных зондов, *б* – для зондов с тороидальными антеннами**

Во время проведения измерений перемещение макета зонда происходило только в вертикальном направлении по оси модели среды (линия  $Z$ , рис. 2.1). Точкой начала записи при спуске макета зонда был выбран момент полного погружения всех электродов. В качестве точки окончания записи принято положение макета зонда, дальше которого движение по вертикали было невозможным из-за слоя изолятора. Запись во время подъема макета зонда проходила по тем же точкам. Шаг между измерениями составлял 0,5 см (как при спуске макета зонда, так и при его подъеме).

После окончания эксперимента производился анализ полученных результатов и сопоставление их с результатами математического моделирования (для ДОЗ), на основании этого принималось решение о необходимости повторных измерений, либо о внесении изменений в методику измерений.

Методика проведения лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами в целом схожа с той, которая была применена для

дипольных зондов. Различия заключались в процессе изготовления макета зонда, применяемой аппаратуре и калибровочных измерениях. Процесс изготовления макетов зондов подробно описан в разделе 2.1. При лабораторном моделировании зондов с тороидальными антеннами в качестве источника сигнала был применен низкочастотный генератор сигналов ГЗ-56/1. В качестве измерительной аппаратуры в первое время применялся осциллограф С1-65А, в дальнейшем он был заменен на милливольтметр ВЗ-38. При измерениях зондами с тороидальными антеннами регистрировалась величина сигнала в приёмной антенне. Для перехода от сигнала в приёмной антенне к значению  $\rho_k$  для каждого макета осевого зонда с тороидальными антеннами были произведены калибровочные измерения в водных растворах солей с разными значениями удельного электрического сопротивления, по результатам которых рассчитывались коэффициенты для каждого макета зонда.

Во время подготовки и проведения экспериментов были выявлены некоторые факторы, которые оказывали существенное влияние на результаты измерения и сначала не учитывались.

#### 2.4. Особенности проведения лабораторного моделирования.

Для получения результатов лабораторного моделирования, близких к результатам математического моделирования (для ДОЗ), необходимо было решить ряд проблем, возникающих в процессе проведения экспериментов.

Вначале при лабораторном моделировании были применены макеты дипольных зондов, показанные на рис. 2.11.

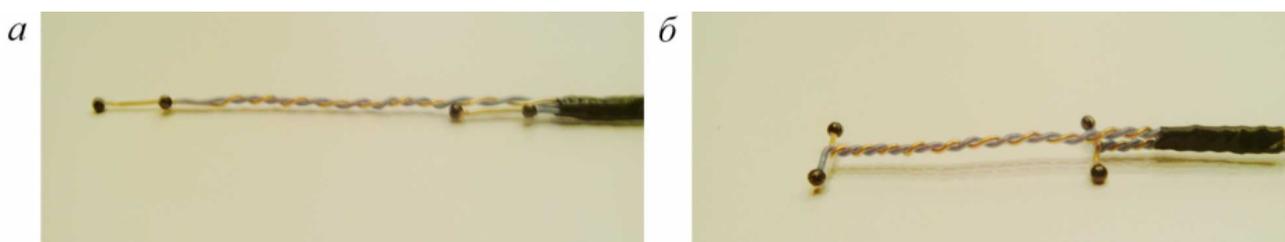


Рис. 2.11. Макет дипольно-осевого зонда (а) и дипольно-экваториального зонда (б) каротажа КС, применённые на первых этапах лабораторного моделирования.

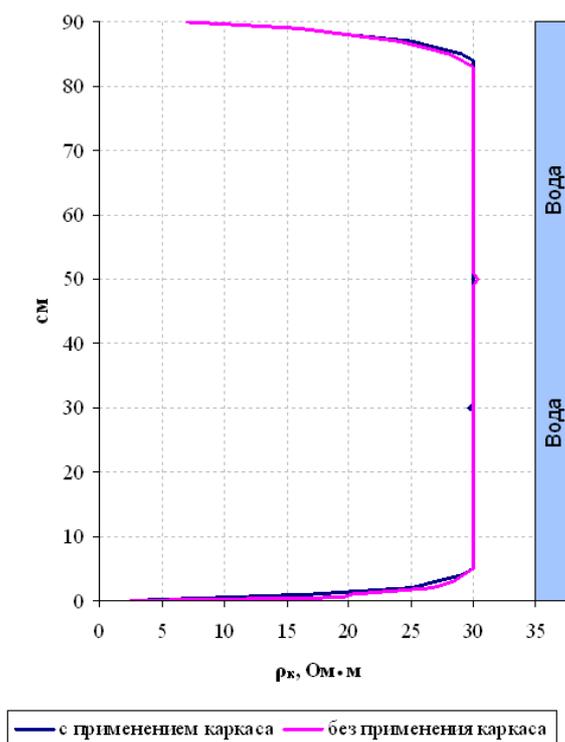
На рис. 2.11 видно, что макеты дипольно-осевого и дипольно-экваториального зонда не имеют жесткого каркаса или корпуса. Такая конструкция зонда была применена на первых этапах для измерений в изотропной модели среды и для моделей пластов небольшой мощности.

При измерениях в моделях пластов большой мощности, макеты таких зондов нередко были деформированы. В первую очередь это касалось макета дипольно-экваториального зонда. Деформация была вызвана неровностью ствола скважины в модели пласта. Так как модель пласта состояла из отдельных слоёв, то при увеличении мощности, увеличивалась и сложность равномерной установки отдельных слоев. Из-за деформации макета зонда происходило изменение положения электродов, что в свою очередь приводило к ошибке определения  $\rho_k$ .

Решить эту проблему удалось применением в макетах дипольных зондов пластмассового каркаса (рис. 2.4). Для определения погрешности, вызванной применением пластмассового каркаса, были проведены измерения макетами дипольно-осевых и дипольно-экваториальных зондов разной конструкции (с каркасом и без), в однородной изотропной модели среды. Пример сравнения результатов, полученных дипольно-осевыми зондами разной конструкции, показан на рис. 2.12 (здесь и ниже расстояния между электродами указаны в сантиметрах).

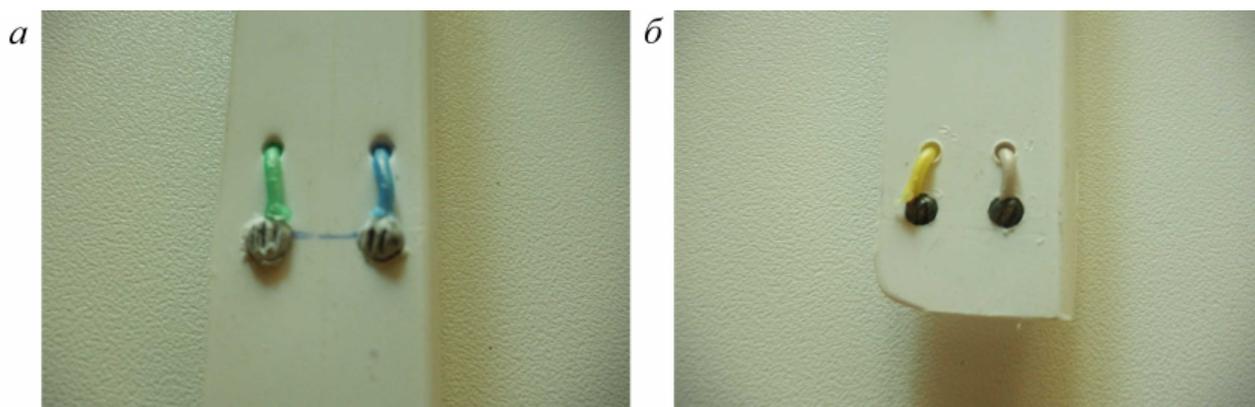
На рис. 2.12 видно, что кривые, полученные макетами зондов разной конструкции, практически идентичны, незначительные различия можно объяснить погрешностью измерительной аппаратуры. Аналогичные результаты были получены и для макетов дипольно-экваториальных зондов разной конструкции. Это дало основание полагать, что пластмассовый каркас не оказывает существенного влияния на результаты измерений.

Применение пластмассового каркаса позволило избавиться от деформации макета зонда, а также упростить процесс центрирования зонда в скважине.



**Рис. 2.12.** Результаты определения погрешности, вносимой пластмассовым каркасом для макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N (расстояния - в сантиметрах).

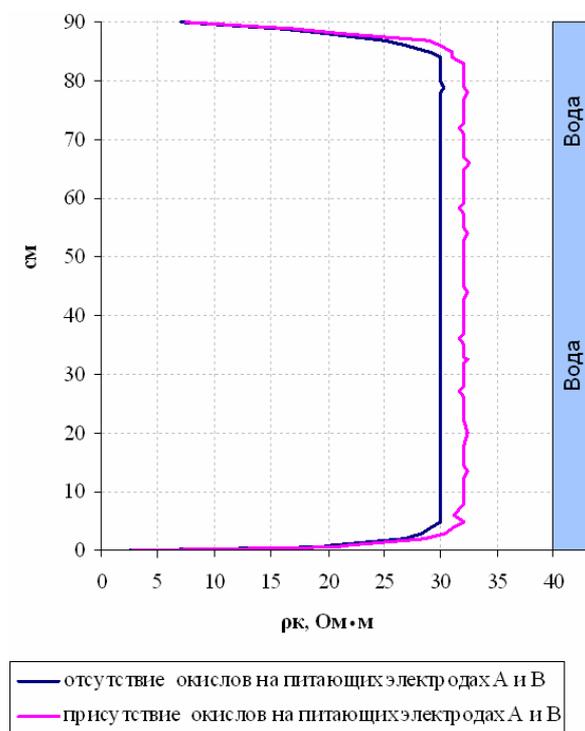
Ещё одна проблема, которая требовала решения, была связана с электродами дипольных зондов. Как уже было отмечено выше, в дипольных зондах были применены свинцовые электроды. Иногда разница между проведением экспериментов составляла сутки и более. За это время на питающих электродах образовывался слой окисла (рис. 2.13, а).



**Рис. 2.13.** Питающие и измерительные электроды после проведения измерений  
**а** – присутствие окислов на питающих электродах *A* и *B*  
**б** - отсутствие окислов на приемных электродах *M* и *N*

*Примечание:* для наглядности изображение на рис. 2.10, а увеличено по сравнению с рис. 2.10, б

Результаты измерений, полученные макетами зондов с такими электродами, отличались повышенными значениями  $\rho_k$ . На рис. 2.14 приведён пример, иллюстрирующий расхождение результатов измерений, вызванных наличием окислов на питающих электродах.



**Рис. 2.14. Сравнение результатов измерения при наличии и отсутствии окислов на питающих электродах A и B (дипольно-осевой зонд A0,5B3M0,5N).**

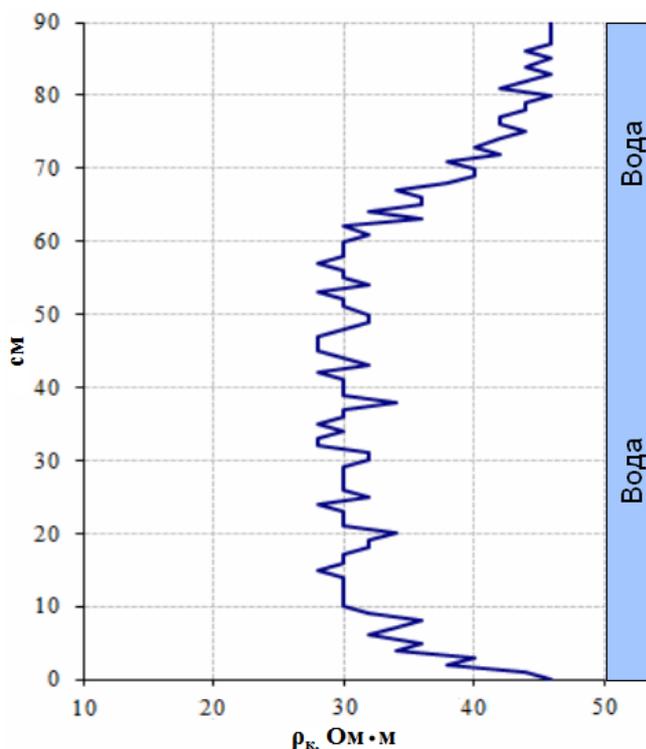
*Измерения были проведены дипольно-осевым зондом, до и после образования слоев окисла*

Как можно видеть на рис. 2.14 кроме завышенных значений  $\rho_k$ , окислы, образовавшиеся на питающих электродах, привели к появлению на записи минимумов и максимумов, не связанных с параметрами "вертикально-однородной" модели среды.

Для решения этой проблемы перед каждым экспериментом визуально оценивалось состояние питающих электродов и при необходимости происходила их замена на новые электроды. После длительных по времени перерывов между экспериментами (сутки и более) всегда проводилась замена электродов на новые.

Первые результаты лабораторного моделирования, в которых были применены макеты зондов с тороидальными антеннами, показали, что на эти

результаты существенное влияние оказывают электромагнитные помехи, которые зависят от положения макета зонда в лабораторной модели среды. На рис. 2.15 приведены результаты, полученные макетом осевого зонда с тороидальными антеннами (ТОЗ) в однородной изотропной модели среды.



**Рис. 2.15.** Пример влияния электромагнитных помех на результаты измерений, полученных макетом осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=5$  см).

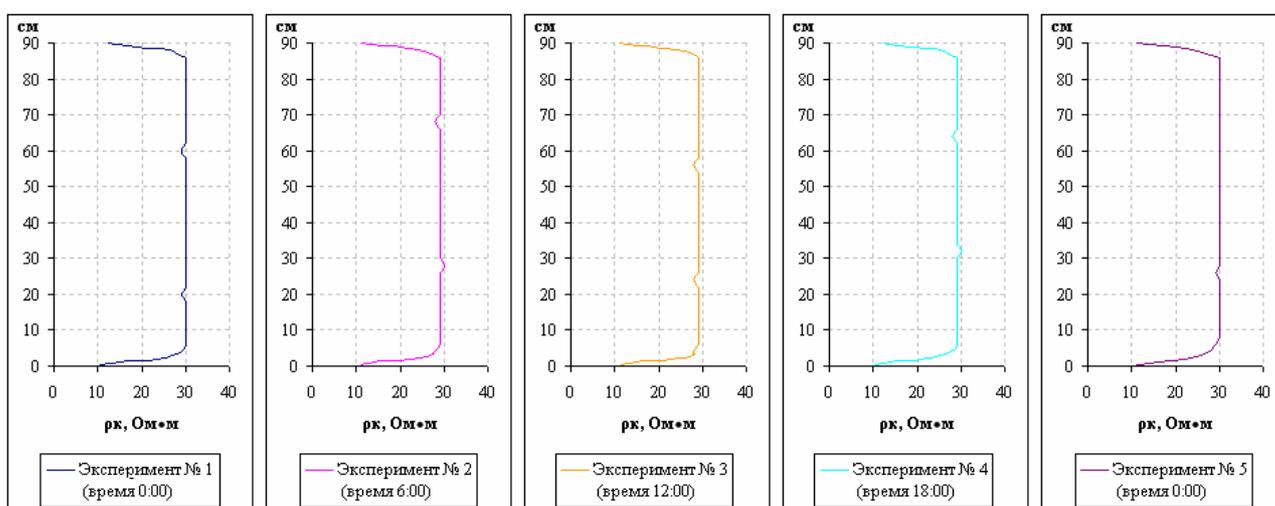
Значительное влияние электромагнитных помех на результаты измерений с тороидальными антеннами можно объяснить работой аппаратуры наличием поблизости электросетей и рядом других факторов. В рамках этой работы задача определения характера и источников электромагнитных помех не была поставлена.

Частично эти проблемы удалось решить, заменой соединительных проводов на коаксиальные. Кроме того, лабораторная установка была покрыта слоем заземлённого проводника - слоем фольги. Принятые меры позволили снизить влияние электромагнитных помех на результаты измерений, но полностью исключить их не удалось.

Проблема деформации макета зонда была также актуальна для зондов с тороидальными антеннами. К сожалению, применение пластмассового каркаса

давало положительные результаты только в случае, когда мощность модели пласта была небольшой. В моделях пласта большой мощности искривление ствола модели скважины и изолированная фольгой лабораторная установка затрудняли позиционирование зонда, что зачастую приводило к повреждению зонда и выходу из строя антенн. В связи с частыми повреждениями тороидальных антенн и необходимостью многократных повторных экспериментов не было получено результатов измерений для моделей пластов большой мощности.

Выявленные зондами с тороидальными антеннами электромагнитные помехи показали необходимость оценки их влияния на результаты измерения с дипольными зондами. Электроразведочный прибор Электротест С, примененный при проведении экспериментов с дипольными зондами, оснащён фильтрами высоких и низких частот. Однако для проверки их работоспособности и экспериментальной оценки погрешности определения значения  $\rho_k$  было принято решение провести измерения одной лабораторной установкой в разное время суток. Лабораторная установка состояла из однородной изотропной модели среды и макета дипольно-осевого зонда А1В4М1N. Интервал между проведением экспериментов составлял 6 часов, полученные результаты представлены на рис. 2.16.



**Рис. 2.16. Результаты измерений, проводимые дипольно-осевым зондом А1В4М1N в разное время суток.**

На рис. 2.16. видно, что формы кривых имеют незначительные различия, на этом основании был сделан вывод об отсутствии влияния электромагнитных помех на результаты измерения, проводимых дипольными зондами. Погрешность определения значения  $\rho_k$  по результатам проведенных измерений не превышала 2%, что соответствует величине, заявленной в технической документации прибора Электротест С.

В процессе проведения лабораторного моделирования были выявлены еще несколько проблем, среди которых проблема расслаивания картона в результате продолжительного пребывания в воде. Результаты лабораторного моделирования и их сравнение с данными математического моделирования показали следующее. При непродолжительном нахождении изготовленной из картона модели пласта в воде пласт по удельному электрическому сопротивлению является практически изотропным ( $\rho_t \approx \rho_n \approx \rho_p$ ,  $\lambda \approx 1$ ). Об этом в частности можно судить, на основании результатов экспериментов, опубликованных автором и его научным руководителем в работах [35, 42, 44]. Длительное нахождение в воде изготовленных из картона моделей пластов приводило к изменению структуры картона. В результате (при длительном нахождении такой модели пласта в воде) эта модель приобретала свойства анизотропного пласта. Фрагменты слоев картона после длительного пребывания в водном растворе солей приведены на рис. 2.17.



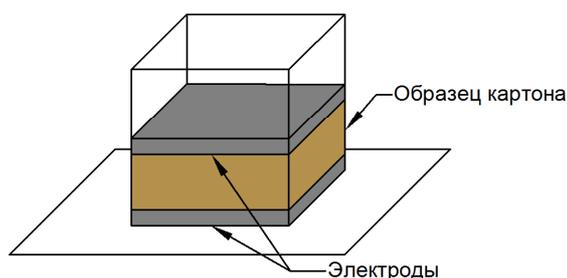
**Рис. 2.17. Фрагменты слоев картона, входивших в состав модели пласта.**

На этом рисунке видно, что картон приобрёл слоистую структуру и связанную с этим электрическую анизотропию. На первых этапах лабораторных экспериментов, не было известно о том, что электрические параметры модели пласта изготовленной из картона столь существенно зависят от длительности нахождения этой модели пласта в воде. Поэтому вначале не удавалось добиться совпадения результатов лабораторного и математического моделирования.

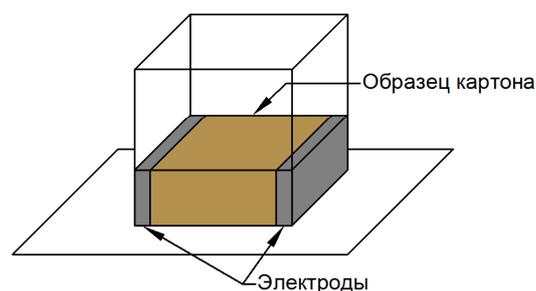
Для решения этой проблемы были приняты следующие меры. Во-первых, было сокращено время пребывания слоев картона в водном растворе солей путём уменьшения интервала между экспериментами и своевременного извлечения модели пласта после окончания работ. Во-вторых, перед установкой модели пласта и после его извлечения визуально оценивалось состояние каждого слоя (на предмет нарушения структуры). В-третьих, слои картона в модели пласта после проведения нескольких экспериментов (не более трёх) были заменены новыми слоями.

Проблема расслаивания картона требовала постоянной оценки его продольного и поперечного удельного электрического сопротивления. Для этих целей были изготовлены специальные измерительные установки. Схематично установки для измерения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  картона представлены на рис. 2.18.

Измерительная установка для определения  $\rho_n$



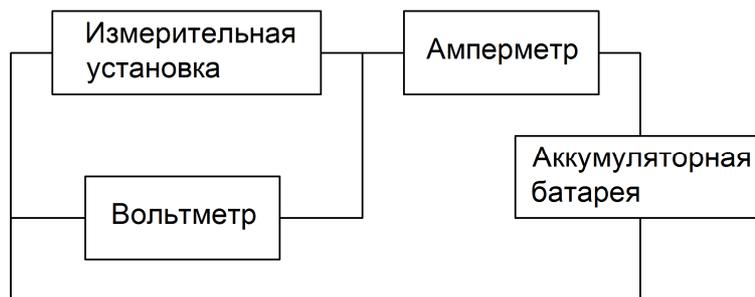
Измерительная установка для определения  $\rho_t$



**Рис. 2.18. Измерительные установки для определения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  картона.**

Измерительные установки для определения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  имели форму куба, грани которого были изготовлены из изолятора (оргстекла). Для фиксации образца внутри измерительной установки одна из граней куба была подвижной, при этом значительного давления на образец не оказывалось во избежание

нарушения его целостности. В качестве электродов были применены свинцовые пластины, одна из которых установлена на подвижную грань куба, а другая – на противоположную ей неподвижную. Различие в конструкциях измерительных установок заключалось в размерах применяемых электродов, так как при измерениях толщина образца составляла 0,5 см (толщина одного слоя картона). Схема проведения измерений представлена на рис. 2.19.



**Рис. 2.19.** Схема проведения измерений  $\rho_t$  и  $\rho_n$  картона.

Значения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  по результатам измерений рассчитывались по формуле:

$$\rho_{n,t} = k \frac{U}{I}, \quad (2.1)$$

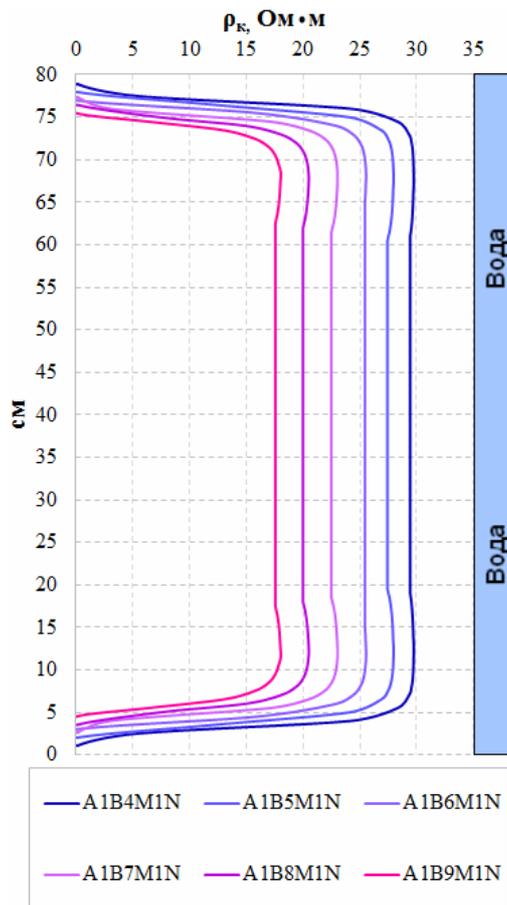
где  $U$  – показание вольтметра в Вольтах,  $I$  – показание амперметра в Амперах,  $k$  – коэффициент установки, который рассчитан в соответствии с размерами образца и применяемых электродов.

Результаты расчётов показали, что в зависимости от степени расслоения образца значения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  картона могут изменяться в широком диапазоне.

Следует отметить, что результаты измерений  $\rho_t$  и  $\rho_n$  полученные на образце картона могут не совпадать со значениями  $\rho_t$  и  $\rho_n$  при лабораторном моделировании. Причины этого могут быть следующими. Во-первых, во время проведения измерений в установке (показанной на рис. 2.18) невозможно было смоделировать то же давление на пласт, что и в лабораторной модели среды. Во-вторых, нельзя полностью учесть степень водонасыщенности картона в измерительной установке. В-третьих, на значения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  могут оказывать влияние эффекты, обусловленные электрохимическими явлениями на границах электронных и ионных проводников.

Тем не менее, результаты измерений  $\rho_t$  и  $\rho_n$  картона при помощи установок, показанных на рис. 2.18, позволяли своевременно принимать решение о замене модели пласта, а также учитывать эти значения при математическом моделировании.

Еще одна проблема, связанная с лабораторным моделированием, была выявлена при математических расчетах, а в последующем подтверждена результатами экспериментов. Сущность проблемы состояла в том, что при длине макета дипольно-осевого зонда более 5 см на результаты измерений оказывает заметное влияние изолятор, ограничивающий (в радиальном направлении) модели пройденного скважиной пласта. В качестве иллюстрации на рис. 2.20 приведены результаты математических расчетов для ДОЗ разной длины в однородной - изотропной модели среды, ограниченной (в радиальном направлении) слоем изолятора.



**Рис. 2.20. Результаты математического моделирования макетов дипольно-осевых зондов разной длины для модели однородно-изотропной среды.**

Математическое моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$D = 19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \lambda = 1$$

На рис. 2.20 видно, что по мере увеличения длины макета зонда корпус лабораторной установки оказывает всё более существенное влияние на результаты измерений. По этой причине в диссертационной работе приведены результаты лабораторного и математического моделирования зондов, размер которых не превышает 5 см, когда цилиндрическая граница лабораторной модели пласта с изолятором не оказывает очень большого влияния на результаты экспериментов.

В результате принятых мер по снижению и устранению влияния различных факторов на результаты физических экспериментов, были получены данные лабораторного моделирования, согласующиеся с математическими расчетами.

### **Выводы.**

1. Для проведения физического моделирования были изготовлены лабораторные установки, которые включали в себя модели среды и макеты нескольких зондов электрического и электромагнитного каротажа. Лабораторная модель среды состояла из модели изотропного, либо анизотропного пласта и моделей вмещающих пласт пород. Кроме лабораторных моделей среды были созданы несколько типов макетов зондов: "осевой зонд" с тороидальными антеннами (ТОЗ), дипольно-осевой зонд (ДОЗ) и дипольно-экваториальный зонд (ДЭЗ).

2. Для проведения лабораторного моделирования была применена следующая аппаратура. В качестве измерительной аппаратуры для экспериментов с дипольными зондами (ДОЗ, ДЭЗ) применен низкочастотный компьютеризированный электроразведочный прибор Электротест С. Для лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами в качестве измерительной аппаратуры первое время применялся осциллограф С1-65А. Затем этот осциллограф послужил для оценки формы сигнала, а измерения производились милливольтметром ВЗ-38. В качестве генератора сигналов был применен прибор ГЗ-56/1.

3. В результате подготовки и проведения экспериментов были выявлены некоторые факторы, которые оказывали существенное влияние на результаты измерений. Среди них: деформация макетов зондов в моделях пластов большой мощности, образование слоев окисла на питающих электродах дипольных зондов, наличие электромагнитных помех, нарушение структуры слоев картона при длительном пребывании в воде. Для решения этих проблем были приняты меры, которые позволили снизить или практически полностью исключить их влияние.

### **Глава 3. Методы, применённые при математическом моделировании.**

Для проверки результатов измерений, полученных при лабораторных экспериментах, проводилось сравнение их с данными математического моделирования. Все результаты математического моделирования, которые приведены в работе, были получены моим научным руководителем, доктором физ.-мат. наук А.Д. Каринским. Научный руководитель также оказал неоценимую помощь при написании этой главы диссертационной работы.

В частности, пользуясь результатами численных расчётов для дипольно-осевого зонда и зонда с соосными тороидальными антеннами, мы могли сопоставить результаты лабораторных экспериментов с данными математического моделирования. Такое сравнение результатов лабораторного и математического моделирования способствовало выявлению и устранению влияния некоторых помех, оказывавших влияние на результаты лабораторного моделирования, и принять меры по их устранению [35].

При возбуждении электромагнитного (ЭМ) поля, лежащим на оси симметрии  $Z$  модели пройденного скважиной пласта, электрическим диполем  $AB$ , либо – при помощи тороидальной антенны с лежащим на оси  $Z$  моментом такой антенны, для численных расчётов требовалась разработка алгоритмов 2D-моделирования, когда в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  с осью  $Z$  компоненты ЭМ поля не зависят от азимутальной координаты  $\varphi$ . Для 2D-математического моделирования в этих случаях моим научным руководителем были применены методы конечных разностей.

В результате применения в качестве заданного источника стационарного электрического поля  $\mathbf{E}$ , расположенного в модели скважины и ориентированного ортогонально оси скважины электрического диполя  $AB$  (дипольно-экваториальный зонд), прямая задача теории поля  $\mathbf{E}$  – становится трёхмерной. В этом случае при любом выборе системы координат компоненты поля  $\mathbf{E}$  и потенциал  $U$  поля  $\mathbf{E}$  зависят от трёх пространственных координат. Моим научным руководителем А.Д. Каринским было получено в аналитическом виде решение такой прямой задачи для случая, когда модель

среды соответствует пройденному скважиной изотропному, либо анизотропному пласту неограниченной мощности. Разработанные на этой основе алгоритмы расчётов и программы послужили основой при построении номограмм для определения параметров электрической анизотропии пройденных скважиной пород по результатам измерений с дипольно-экваториальным зондом каротажа КС.

В главе кратко рассмотрена методика проведения математического моделирования.

### **3.1. Методика численных расчётов при осевой симметрии лабораторной установки.**

Рассмотрим случай, когда квазистационарное ЭМ поле в немагнитной среде – гармонически меняется с частотой  $f = \omega/(2\pi)$ , где  $\omega$  круговая частота. Сделаем следующий выбор. При применении комплексной записи временной фактор имеет вид  $\exp(-i\omega t)$ , где  $t$  - время,  $i$  - мнимая единица. При удельном электрическом сопротивлении изотропной среды  $\rho$  волновое число  $k = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , Гн/м магнитная постоянная.

Одноосно-анизотропную среду с осью анизотропии  $n$  и нормальному к  $n$  направлению  $t$  характеризуют соответственно поперечное  $\rho_n$  и продольное  $\rho_t$  удельные электрические сопротивления, а также – волновые числа  $k_n = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho_n}$ ,  $k_t = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho_t}$ . Коэффициент анизотропии  $\lambda = (\rho_n/\rho_t)^{1/2} = k_t/k_n$ .

Допустим, что модель среды - осесимметричная, кусочно-однородная, и её однородные части изотропны, либо одноосно-анизотропны с осью анизотропии  $n$ , параллельной оси симметрии  $Z$  модели среды. Границы (поверхности раздела однородных областей) – коаксиальные цилиндрические с осью  $Z$  и плоские, ортогональные оси  $Z$ . Сторонними возбудителями ЭМ поля могут служить лежащие на оси  $Z$  переменный или постоянный электрический диполь, линия  $AB$  электрического тока  $I$ , тороидальная антенна с моментом по оси  $Z$ . При этих условиях электрическая составляющая ( $E$ ) ЭМ поля имеет

чётную цилиндрическую симметрию, а магнитная ( $\mathbf{H}$ ) – нечётную цилиндрическую симметрию относительно оси  $Z$ . Тогда в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  с осью  $Z$  по оси симметрии для напряженностей электрического и магнитного полей имеем:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{1}_r E_r + \mathbf{1}_z E_z, \quad \mathbf{H} = \mathbf{1}_\varphi H_\varphi, \quad E_r = E_r^0 \exp(-i\omega t), \quad E_z = E_z^0 \exp(-i\omega t), \\ H_\varphi &= H_\varphi^0 \exp(-i\omega t), \quad E_r^0 = E_r^0(r, z), \quad E_z^0 = E_z^0(r, z), \quad H_\varphi^0 = H_\varphi^0(r, z), \end{aligned} \right\} \quad (3.1.1)$$

где  $E_r^0, E_z^0, H_\varphi^0$  комплексные амплитуды компонент гармонически меняющегося ЭМ поля, либо компоненты стационарного поля.

При учёте выражений (3.1.1) численные решения прямых задач методами конечных разностей удобнее получать для  $H_\varphi^0$  – единственной ненулевой компоненты магнитного поля в цилиндрических координатах. Кроме того, на тех интервалах оси  $Z$ , где нет линейных токов, значения  $H_\varphi^0$  известны. На этих интервалах  $H_\varphi^0 = 0$ .

В работе [34] показано следующее. Там, где плотность  $\mathbf{j}^{\text{CT}}$  стороннего электрического тока в однородной одноосно-анизотропной (либо изотропной) области пространства соответствующая условиям (3.1.1), компонента  $H_\varphi^0$  удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\lambda^2 \Lambda_r H_\varphi^0 + \Lambda_z H_\varphi^0 + k_t^2 H_\varphi^0 = 0, \quad (3.1.2)$$

где  $\Lambda_r H_\varphi^0 = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot H_\varphi^0)}{\partial r} \right]$ ,  $\Lambda_z H_\varphi^0 = \frac{\partial^2 H_\varphi^0}{\partial z^2}$ . Компоненты  $E_r^0, E_z^0$  связаны с  $H_\varphi^0$

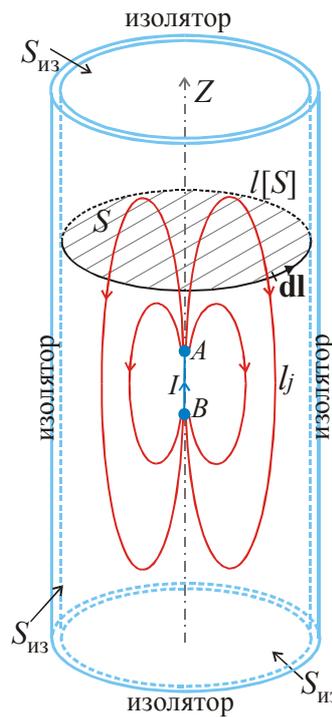
равенствами:

$$E_r^0 = -\rho_t \cdot \frac{\partial H_\varphi^0}{\partial z}, \quad E_z^0 = \frac{\rho_n}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot H_\varphi^0)}{\partial r} = \frac{\rho_t \cdot \lambda^2}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot H_\varphi^0)}{\partial r}. \quad (3.1.3)$$

Отметим, что применение 2D-модели среды в виде прямого кругового цилиндра, ограниченного изолятором, явилось благоприятным условием для задания краевых условий при математическом моделировании. Для таких моделей среды при постановке и численном решении прямых задач электродинамики, либо задач теории стационарного поля, есть (уникальная при применении таких методов для решения прямых задач электродинамики)

возможность точно задать краевые условия на границе проводящей среды с изолятором для азимутальной компоненты  $H_\varphi$  магнитного поля.

На рис. 3.1 показаны ограниченная поверхностями изоляторов  $S_{\text{из}}$  модель проводящей среды в форме прямого кругового цилиндра и (в качестве примера) лежащий на оси симметрии  $Z$  модели среды сторонний возбудитель поля в виде линии  $AB$  линейного электрического тока  $I$ . Показаны также токовые линии  $l_j$  – линии вектора плотности  $\mathbf{j}$  объёмного электрического тока.



**Рис. 3.1. Токовые линии  $l_j$  в ограниченном изолятором проводнике в форме прямого кругового цилиндра.**

Согласно закону полного тока, в случае стационарного поля, либо квазистационарного ЭМ поля циркуляция

$$\oint_{l[S]} H_\varphi \cdot dl = I_S = \int_S j_z \cdot dS. \quad (3.1.4)$$

Очевидно, что применительно к показанной на рис. 3.1 модели поток  $I_S$  вектора  $\mathbf{j}$  через ограниченную окружностью  $l[S]$  поверхность  $S$  в форме круга (с радиусом границы  $l[S]$  проводника с изолятором) равен нулю. Отсюда следует, что для показанной на рис. 3.1 модели на границах изоляторов  $S_{\text{из}}$  компонента  $H_\varphi = 0$ . Это условие на границе с изолятором было учтено при постановке краевых задач электродинамики и при разработке алгоритмов численного

решения прямых задач для моделей, соответствующих тем, которые были применены при лабораторном моделировании для ДОЗ и ТОЗ.

Решение рассматриваемых здесь прямых задач, помимо уравнения (3.1.2), справедливого в каждой однородной части среды, должно удовлетворять следующим дополняющим его условиям (условиям единственности).

1. Условие у особой линии или точки. Если сторонний возбудитель поля (в виде переменного электрического диполя, элементарного тороида или линии электрического тока) окружен изотропной средой с  $\rho = \rho_1$ , а  $R$  – расстояние от стороннего возбудителя поля до точки наблюдения, то при  $R \rightarrow 0$  компонента  $H_\varphi^0 \rightarrow \infty$ , как в безграничной однородной среде с  $\rho = \rho_1$ .

2. Условие на границе с изолятором:  $H_\varphi^0 = 0$ .

3. Условия сопряжения на особых поверхностях  $S_{oc}$  (поверхностях разрыва  $\rho_t$  или  $\lambda$ ) сводятся к непрерывности тангенциальных к этим поверхностям компонент векторов  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$ . Это означает, что для рассматриваемых здесь моделей среды:

- а) на цилиндрических границах  $r = \text{const}$  непрерывны компоненты  $H_\varphi^0$  и  $E_z^0$ ,
- б) на плоских границах  $z = \text{const}$  непрерывны компоненты  $H_\varphi^0$  и  $E_r^0$ .

Для постановки разностной задачи требуется следующее: аппроксимация дифференциального уравнения (3.1.2) конечно-разностным уравнением; замена условий на поверхностях изоляторов  $S_{из}$  соответствующими краевыми условиями на «внешних границах» сетки; замена условий у особых точек и линий разностными условиями вблизи этих точек и линий; аппроксимация условий сопряжения на особых поверхностях  $S_{oc}$  разностными отношениями вблизи поверхностей  $S_{oc}$ . Будем применять обозначение  $H$  для сеточной функции, соответствующей непрерывной функции  $H_\varphi^0$  аргументов  $r$  и  $z$ . Для численного решения прямой задачи методом конечных разностей воспользуемся неравномерной сеткой с координатами узлов  $r_j$ ,  $z_i$  ( $1 \leq j \leq N_r$ ,  $1 \leq i \leq N_z$ ), заполняющей ограниченную линиями  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  часть  $\Phi$

полуплоскости  $\varphi = \text{const}$  (рис. 3.1.2). Значения  $H$  в узлах сетки, лежащих на линиях  $l_1, l_2, l_3$ , должны быть заданы.

Линия  $l_2$  отделяет сторонний возбудитель  $T$  электромагнитного поля от  $\Phi$ . Значения  $H$  в узлах сетки, лежащих на линии  $l_2$ , это – разностный аналог условий у особых линий или точек в краевых задачах электродинамики. Значения  $H$  в этих узлах могут быть заданы, например, на основе расчетов для цилиндрически-слоистой модели среды, внутренний слой которой (цилиндр) имеет параметры  $\rho_t = \rho_{t1}$  и  $\lambda = \lambda_1$ , либо – на основе расчетов для однородной изотропной среды – с  $\rho = \rho_1$ . Если сторонний возбудитель поля имеет ограниченную протяженность (электрический диполь, токовая линия  $AB$ , элементарная тороидальная антенна), то линия  $l_2$  имеет П-образную форму (см. рис. 3.2). На линиях  $l_1, l_3$ , в соответствии со сказанным выше, значения  $H = 0$ .

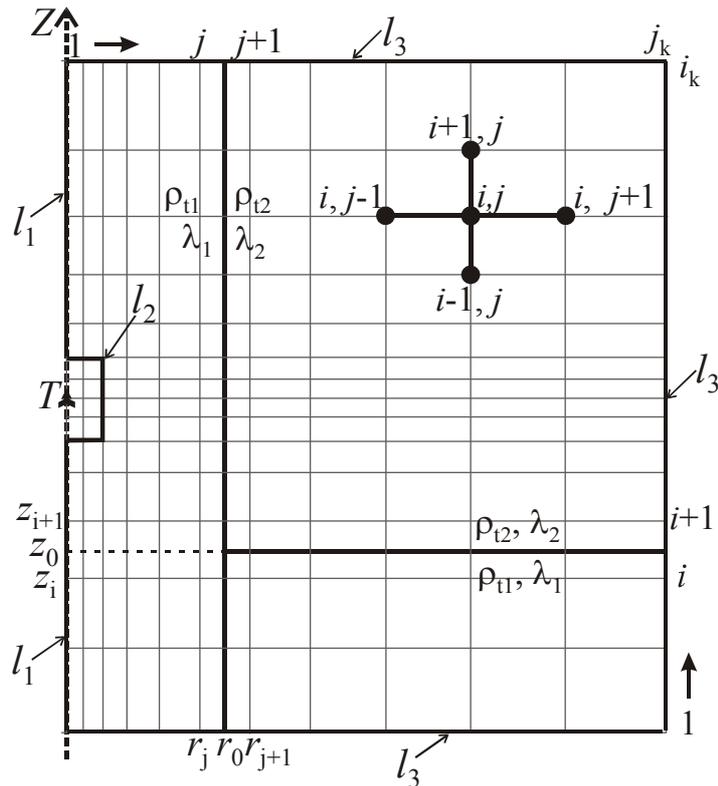


Рис. 3.2. К численному решению осесимметричной прямой задачи методом сеток.

Рассмотрим сначала разностную схему для случая, когда в пределах  $\Phi$  среда однородна, а потом внесем коррективы, требующиеся в присутствии коаксиально-цилиндрических и плоско-параллельных границ. Начнём с разностной аппроксимации уравнения (3.1.2).

Пусть внутренние узлы сетки (не лежащие на линиях  $l_1, l_2, l_3$ ) вместе с соседними узлами находятся в однородных изотропных, либо одноосно-анизотропных частях среды. Для конечно-разностной аппроксимации уравнения (3.1.2) в таких узлах сетки воспользуемся пятиточечным шаблоном с координатами узловых точек  $r_j, z_i; r_{j+1}, z_i; r_j, z_{i+1}; r_{j+1}, z_{i+1}$  (см. рис. 3.1.2). Тогда разностный аналог уравнения (3.1.2) для  $H$  можем записать в следующем виде:

$$\lambda_{i,j}^2 L_r H_{i,j} + L_z H_{i,j} + k_{i,j}^2 H_{i,j} = 0, \quad (3.1.5)$$

где

$$L_z H_{i,j} = Z_1 \cdot H_{i-1,j} + Z_2 \cdot H_{i,j} + Z_3 \cdot H_{i+1,j}, \quad Z_1 = \frac{2}{(z_{i+1} - z_{i-1})(z_i - z_{i-1})},$$

$$Z_2 = \frac{-2}{(z_{i+1} - z_i)(z_i - z_{i-1})}, \quad Z_3 = \frac{2}{(z_{i+1} - z_{i-1})(z_{i+1} - z_i)},$$

$$L_r H_{i,j} = R_1 \cdot H_{i,j-1} + R_2 \cdot H_{i,j} + R_3 \cdot H_{i,j+1}, \quad R_1 = \frac{r_{j-1}(3r_j - r_{j-1})}{r_j^2 (r_{j+1} - r_{j-1})(r_j - r_{j-1})},$$

$$R_2 = \frac{-2}{(r_{j+1} - r_j)(r_j - r_{j-1})}, \quad R_3 = \frac{r_{j+1}(3r_j - r_{j+1})}{r_j^2 (r_{j+1} - r_{j-1})(r_{j+1} - r_j)}.$$

Для определения  $H_{i,j}$  имеем систему алгебраических уравнений, число которых равно числу внутренних узлов сетки. Для итерационного решения системы таких уравнений (с большим числом неизвестных  $H_{i,j}$ ) были применены методы установления, расщепления и прогонки.

Далее рассмотрим конечно-разностную аппроксимацию условий сопряжения.

Пусть внутренние узлы сетки с координатами  $r_j, r_{j+1}$  расположены по разные стороны цилиндрической границы (поверхности разрыва  $\rho_t$  или  $\lambda$ ) с радиусом  $r_0$ , либо узлы с координатами  $z_i, z_{i+1}$  находятся по разные стороны плоской границы  $z = z_0$  (см. рис. 3.2). В этих ситуациях при прогонках вдоль строк или вдоль столбцов надо обеспечить выполнение конечно-разностных аналогов условий сопряжения на особых поверхностях для компонент электрического поля.

Рассмотрим сначала случай, когда цилиндрическая граница с радиусом  $r_0$  разделяет две области пространства с продольными удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и коэффициентами анизотропии  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ . На части  $\Phi$  полуплоскости  $\varphi = \text{const}$  границе  $r = r_0$  соответствует отрезок прямой, параллельный оси  $Z$ . Пусть эта граница лежит между «столбцами» сетки с координатами  $r_j$  и  $r_{j+1}$  (см. рис. 3.2). Применим обозначение  $E_z$  для сеточной функции, соответствующей комплексной амплитуде  $E_z^0$ . Рассмотрим то, как можно обеспечить непрерывность  $E_z$  на границе  $r = r_0$  при выбранном нами подходе к решению конечно-разностной задачи.

Разностную аппроксимацию выражения (3.1.3) для  $E_z^0$  на узлах сетки, расположенных вблизи цилиндрической границы, запишем в виде:

$$E_z^- = 2\rho_1\lambda_1^2 \cdot \frac{r_j H_j - r_{j-1} H_{j-1}}{r_j^2 - r_{j-1}^2}, \quad E_z^+ = 2\rho_2\lambda_2^2 \cdot \frac{r_{j+1} H_{j+1} - r_j H_j}{r_{j+1}^2 - r_j^2}$$

где  $E_z^-$  и  $E_z^+$  - значения  $E_z$  по разные стороны границы  $r = r_0$ . Для непрерывности  $E_z$  потребуем, чтобы

$$\rho_1\lambda_1^2 \cdot \frac{r_j H_j - r_{j-1} H_{j-1}}{r_j^2 - r_{j-1}^2} = \rho_2\lambda_2^2 \cdot \frac{r_{j+1} H_{j+1} - r_j H_j}{r_{j+1}^2 - r_j^2}.$$

Из последнего равенства для сеточной функции  $H$  и для ее действительной и мнимой частей  $X$ ,  $Y$  получаем:  $H_j = K \cdot H_{j+1} + K_1 \cdot H_{j-1}$ ,  $X_j = K \cdot X_{j+1} + K_1 \cdot X_{j-1}$ ,  $Y_j = K \cdot Y_{j+1} + K_1 \cdot Y_{j-1}$ , где

$$K = \frac{r_{j+1}}{r_j(1+G)}, \quad K_1 = \frac{r_{j-1}G}{r_j(1+G)}, \quad G = \frac{\lambda_1^2\rho_1}{\lambda_2^2\rho_2} \cdot \frac{r_{j+1}^2 - r_j^2}{r_j^2 - r_{j-1}^2}.$$

Перейдем к случаю, когда модель среды имеет плоскую границу  $z = z_0$  двух участков среды с продольными удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Пусть эта граница расположена между строками сетки с координатами  $z_i$  и  $z_{i+1}$  (см. рис. 3.2). При решении рассматриваемых задач на такой границе требуется обеспечить непрерывность  $E_r^0$ . Соответствующую комплексной амплитуде  $E_r^0$  сеточную функцию обозначим  $E_r$ . Разностная

аппроксимация первого из выражений (3.1.3) для соседних узлов сетки, расположенных по разные стороны границы  $z = z_0$  имеет вид:

$$E_r^+ = -\rho_2 \frac{H_{i+1} - H_i}{z_{i+1} - z_i}, \quad E_r^- = -\rho_1 \frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}.$$

Для непрерывности  $E_r$  на границе потребуем, чтобы

$$\rho_1 \frac{H_i - H_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} = \rho_2 \frac{H_{i+1} - H_i}{z_{i+1} - z_i}.$$

Отсюда следует, что функция  $H$  – её действительная и мнимая части  $X$ ,  $Y$  должны удовлетворять равенствам:  $H_i = K' \cdot H_{i+1} + K'_1 \cdot H_{i-1}$ ,

$X_i = K' \cdot X_{i+1} + K'_1 \cdot X_{i-1}$ ,  $Y_i = K' \cdot Y_{i+1} + K'_1 \cdot Y_{i-1}$ , где

$$K' = \frac{1}{1+F}, \quad K'_1 = \frac{F}{1+F}, \quad F = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{z_{i+1} - z_i}{z_i - z_{i-1}}.$$

Приведенная выше разностная схема послужила основой для разработки алгоритмов численных расчётов и программ для компьютера. В результате расчётов по этим программам получаем во всех узлах сетки значения действительной части  $X$  и мнимой части  $Y$  сеточной функции  $H$ , соответствующей комплексной амплитуде  $H_\varphi^0$  магнитного поля. Значения компонент  $E_z$  и  $E_r$  электрического поля в узлах сетки определяем, пользуясь разностной аппроксимацией выражений (3.1.3). По компоненте  $E_z$  в узлах сетки не сложно определить, например, напряжение электрического поля в ориентированной по оси  $Z$  измерительной линии  $MN$ .

### **3. 2. Решение прямой задачи теории каротажа КС при смещённом с оси симметрии модели среды точечном токовом электроде и анизотропии окружающей скважину среды.**

На рис. 3.3, *a* показана модель, для которой было получено решение прямой задачи теории стационарного электрического поля  $E$ . Изотропная область  $V_1$  с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$  в форме неограниченного по высоте кругового цилиндра – модель скважины. "Внешняя" область пространства  $V_2$ , анизотропная по удельному

электрическому сопротивлению  $\rho$ , с осью анизотропии  $n$ , параллельной оси модели скважины, и удельными электрическими сопротивлениями  $\rho_n$ ,  $\rho_t$ . Точечный электрод  $A$  расположен в области  $V_1$  на расстоянии  $r_A$  от оси симметрии  $Z$  модели среды. Стационарное электрическое поле с напряжённостью  $\mathbf{E}$  представим в виде:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^n + \mathbf{E}^b = -\text{grad}U, \quad U_{1,2} = U^n + U_{1,2}^b, \quad (3.2.1)$$

где  $U_{1,2}$  и  $U_{1,2}^b$  – потенциалы суммарного ( $\mathbf{E}$ ) и вторичного ( $\mathbf{E}^b$ ) полей соответственно в областях пространства  $V_1, V_2$ .

Источник первичного поля  $\mathbf{E}^n$  с потенциалом  $U^n$  – заряд  $e_A$  точечного токового электрода  $A$  с эмиссией  $I$ . Если электрод  $A$  расположен в среде с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$ , то  $e_A = \varepsilon_0 \cdot \rho_1 \cdot I$ , где  $\varepsilon_0 \approx 10^{-9}/(36 \cdot \pi)$ , Ф/м – электрическая постоянная. Источники вторичного поля  $\mathbf{E}^b$  – индуцированные заряды. Это поверхностные заряды на границе  $S$  областей  $V_1, V_2$  (см. рис. 3.3), а также объёмные заряды в области  $V_2$ , если  $\rho_n \neq \rho_t$  и коэффициент анизотропии  $\lambda = (\rho_n/\rho_t)^{1/2} \neq 1$ .

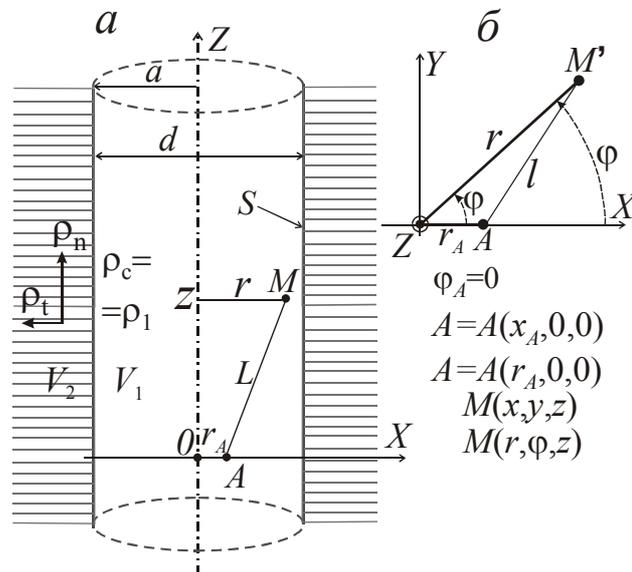


Рис. 3.3.

Воспользуемся декартовыми  $(x, y, z)$  и цилиндрическими  $(r, \varphi, z)$  координатами с общими осью  $Z$ , началом координат  $0$  и с началом отсчёта азимутальной координаты  $\varphi$  от направления оси  $X$ . Пусть электрод  $A$  лежит в плоскости  $z = 0$  на оси  $X$  и на расстоянии  $r_A$  от начала координат, а точка

наблюдения  $M$  имеет произвольные координаты  $x, y, z, r, \varphi$  (рис. 3.3). Тогда для координат точек  $A$  и  $M$  справедливы равенства  $x_A = r_A, y_A = 0, z_A = 0, \varphi_A = 0$ ;  $x = r \cdot \cos \varphi, y = r \cdot \sin \varphi, z = z$ . Отметим также, что на рис. 3.2.1, б в плоскости  $z = 0$  показаны положение точки  $A$  и проекции  $M'$  точки  $M$  на эту плоскость.

Известно, что потенциал  $U^n = \frac{C}{L} = \frac{C}{\sqrt{(x-x_A)^2 + y^2 + z^2}}, C = \frac{\rho_1 I}{4\pi}$ .

Расстояние между точками  $A$  и  $M$ :  $L = \sqrt{l^2 + z^2}$ , где  $l^2 = r_A^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot r_A \cdot \cos \varphi$ .

Пользуясь интегралом Вебера

$$\frac{1}{\sqrt{l^2 + z^2}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty K_0(ml) \cos(mz) dm,$$

(где  $K_0(ml)$  – модифицированная функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка аргумента  $ml$ ), можем представить выражение для потенциала  $U^n$  в следующем виде

$$U^n = \frac{2C}{\pi} \int_0^\infty K_0\left(m\sqrt{r^2 + r_A^2 - 2 \cdot r \cdot r_A \cdot \cos \varphi}\right) \cos(mz) dm.$$

В соответствии с теоремой сложения для функций Бесселя

$$K_0\left(m\sqrt{r^2 + r_A^2 - 2 \cdot r \cdot r_A \cdot \cos \varphi}\right) = K_0(mr_A)I_0(mr) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_n(mr_A)I_n(mr) \cos(n\varphi) =$$

$$2 \sum_{n=0(0.5)}^{\infty} K_n(mr_A)I_n(mr) \cos(n\varphi),$$

где  $I_n(\xi), K_n(\xi)$  – модифицированные функции Бесселя соответственно 1-го и 2-го рода порядка  $n$  аргумента  $\xi$ . В правой части последнего равенства обозначение  $n = 0(0.5)$  в ряде  $\Sigma$  указывает на то, что соответствующий значению  $n = 0$  член ряда следует умножить на 0.5. Итак, потенциал первичного поля  $E^n$  в точке  $M$  можем представить в следующем виде

$$U^n = \frac{4C}{\pi} \int_0^\infty \left[ \sum_{n=0(0.5)}^{\infty} K_n(mr_A)I_n(mr) \cos(n\varphi) \right] \cos(mz) dm. \quad (3.2.2)$$

При постановке краевой задачи, соответствующей показанной на рис. 3.3 модели, было принято во внимание следующее. Для стационарного электрического поля справедливо уравнение непрерывности электрического

тока:  $\text{div } \mathbf{j} = 0$ , где  $\mathbf{j}$  – вектор плотности тока. В изотропной области  $V_1$  по закону Ома в дифференциальной форме  $\mathbf{j}^{(1)} = \mathbf{E}^{(1)}/\rho_1 = -\text{grad}U_1/\rho_1$ . В анизотропной области  $V_2$  скалярные компоненты вектора  $\mathbf{j}$  в цилиндрической системе координат определяют равенства:  $j_r^{(2)} = \frac{1}{\rho_t} E_r^{(2)} = -\frac{1}{\rho_t} \frac{\partial U_2}{\partial r}$ ,  $j_\varphi^{(2)} = \frac{1}{\rho_t} E_\varphi^{(2)} = -\frac{1}{r \cdot \rho_t} \frac{\partial U_2}{\partial \varphi}$ ,  $j_z^{(2)} = \frac{1}{\rho_n} E_z^{(2)} = -\frac{1}{\rho_n} \frac{\partial U_2}{\partial z}$ . На основе этого были получены дифференциальные уравнения для потенциалов  $U_1, U_2$ . Кроме них краевая задача включает краевые условия на бесконечности, условие у особой точки  $A$ , и условия сопряжения на границе  $S$ , на которой координата  $r = a = d/2$ . На этой границе непрерывны потенциал  $U$  и нормальная к  $S$  компонента  $j_r$  вектора  $\mathbf{j}$ . Поэтому для показанной на рис. 3.3 модели можем поставить следующую краевую задачу для потенциала  $U$  стационарного электрического поля  $\mathbf{E}$ .

$$\left. \begin{aligned} 1) \text{ При } r < a: \quad & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial z^2} = 0; \\ 2) \text{ при } r > a: \quad & \frac{\lambda^2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_2}{\partial r} \right) + \frac{\lambda^2}{r^2} \frac{\partial^2 U_2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial z^2} = 0; \\ 3) \text{ при } L \rightarrow \infty: \quad & U_1 \rightarrow 0, U_2 \rightarrow 0; \\ 4) \text{ при } L \rightarrow 0: \quad & U_1 \rightarrow \infty \text{ как } U^n; \\ 5) \text{ при } r = a: \quad & \text{а) } U_2 = U_1, \text{ б) } \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial U_2}{\partial r} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial r}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2.3)$$

Во втором выражении в (3.2.3)  $\lambda^2 = \rho_n/\rho_t$ .

При получении решений дифференциальных уравнений для потенциалов  $U_{1,2}$  в (3.2.3) был применён подход, аналогичный тому, который (для изотропной модели среды) приведен в монографии Б. С. Светова [54, с. 126 - 129]. Применяя метод разделения переменных и при учёте того, что потенциалы  $U_{1,2}$  – это чётные функции аргумента  $z$  и чётные периодические функции аргумента  $\varphi$ , можем представить удовлетворяющие первым четырём условиям в (3.2.3) в следующем виде.

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{4C}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \left[ \sum_{n=0(0.5)}^\infty [K_n(mr_A)I_n(mr) + A \cdot I_n(mr)] \right] \cos(n\varphi) \cos(mz) dm \right\}, \\ U_2 &= \frac{4C}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \left[ \sum_{n=0(0.5)}^\infty [K_n(mr_A)I_n(mr) + B \cdot K_n(mr)] \right] \cos(n\varphi) \cos(mz) dm \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (3.2.4)$$

где  $A, B$  – множители, зависящие от параметров показанной на рис. 3.3 модели и не зависящие от координат  $r, \varphi, z$  точки наблюдения  $M$ . Для определения этих множителей послужили условия сопряжения на границе модели скважины (при  $r = a$ ) в краевой задаче (3.2.3).

Согласно (3.2.4), выражение для потенциала  $U_1$  в расположенной в точке наблюдения  $M$  области  $V_1$  (модели скважине) имеет вид несобственных интегралов в смысле главного значения. Подынтегральные функции – бесконечные ряды. Члены этих рядов содержат модифицированные функции Бесселя первого и второго рода:  $I_m, K_m$  целого порядка  $m$ , а также – тригонометрические функции  $\cos(mz), \cos(n\varphi)$ . На основе полученного решения для потенциала  $U(M)$  поля  $\mathbf{E}(M)$  было не сложно перейти к случаю, когда источниками первичного поля  $\mathbf{E}^{\text{п}}$  являются токовые электроды  $A, B$  (с эмиссиями  $I$  и  $-I$  соответственно), а измеряемой величиной является разность потенциалов  $\Delta U_{MN} = U_M - U_N$  между точечными измерительными электродами, расположенными в точках  $M, N$ .

Главной проблемой при математическом моделировании для показанной на рис. 3.3 модели было, конечно, не нахождение решения прямой задачи, а разработка алгоритмов расчётов и программ для компьютера, которые позволили бы проводить моделирование на основе полученного решения. Проблемы эти удалось преодолеть пока для того (практически значимого) случая, когда электроды  $A, B, M, N$  дипольно-экваториального зонда расположены на границе скважины, то есть при  $r_A = r = a$ . (см. рис. 3.3). Созданные на основе полученного решения и алгоритмов расчётов программы для компьютера послужили для математического моделирования, результаты которого приведены, в главах 2, 4, 5, а также в работах [35,36].

**Выводы.**

1. При 2D-математическом моделировании, соответствующем условиям лабораторных измерений с дипольно-осевыми зондами и зондами с тороидальными антеннами, моим научным руководителем был применён метод конечных разностей. Сопоставление результатов расчётов и лабораторных экспериментов позволило выявить ряд помех, влиявших на результаты лабораторного моделирования, и принять меры по устранению этого влияния.

2. Для количественного определения того, какое влияние оказывает скважина на результаты измерений с дипольно-экваториальным зондом (ДЭЗ) каротажа КС, потребовалось получить решение 3D-прямой задачи теории стационарного электрического поля. Такое решение моим научным руководителем было получено для модели, показанной на рис. 3.3, *a*. На основе этого решения были разработаны алгоритмы расчётов и проведены вычисления, результаты которых послужили для построения приведённых в главе 5 номограмм для интерпретации результатов измерений с ДЭЗ.

## **Глава 4. Результаты лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.**

### **4.1. Результаты лабораторного моделирования дипольно-осевых зондов.**

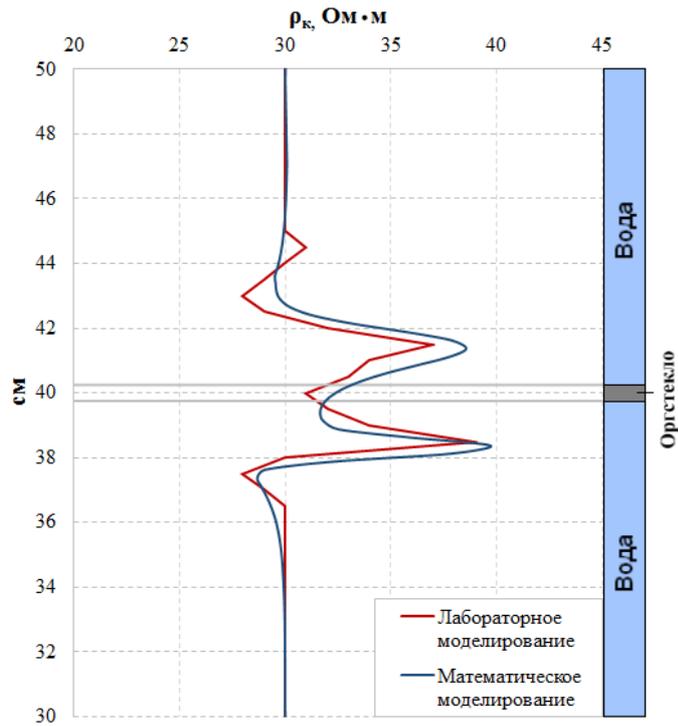
Первые результаты измерений были получены макетом дипольно-осевого зонда в однородной изотропной модели среды. Лабораторная модель такой среды приведена на рис. 2.3, б, а результаты измерений показаны на рис. 2.12 (синим цветом) и рис. 2.14 (синим цветом). Модель однородной изотропной среды была применена для калибровочных измерений всех макетов зондов. В дальнейшем в лабораторных моделях среды были применены специально изготовленные модели пластов, различные по мощности и удельному электрическому сопротивлению. При лабораторных экспериментах были смоделированы следующие пласты:

- высокого удельного электрического сопротивления,
- низкого удельного электрического сопротивления,
- с низким значением коэффициента анизотропии,
- из чередующихся слоёв с разными удельными сопротивлениями

Подробнее рассмотрим результаты измерений, полученные для различных моделей пласта.

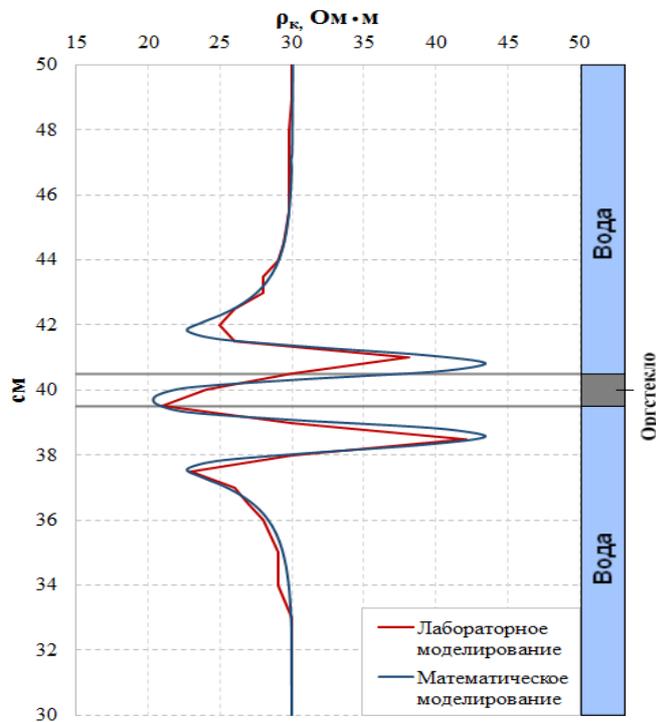
#### *Модель пласта высокого удельного электрического сопротивления*

Для моделирования пласта высокого удельного электрического сопротивления были применены слои оргстекла (рис. 2.2, а). Ниже приведено сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N (здесь и ниже расстояния между электродами указаны в сантиметрах) для моделей пластов высокого удельного электрического сопротивления различной мощности. По горизонтальным осям показаны значения кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  (в Ом·м), а по вертикальным осям координаты точек записи зондов (в сантиметрах) в лабораторной модели среды.



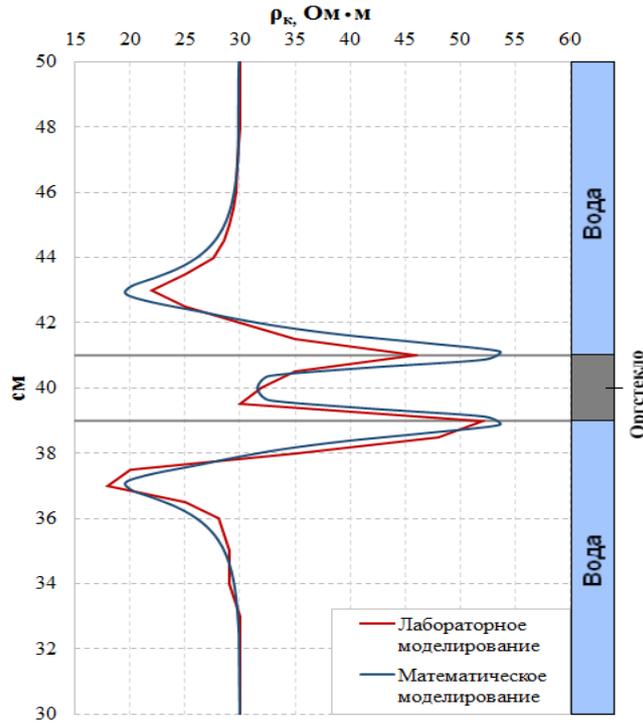
**Рис. 4.1.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 0,5 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=3000$  Ом·м)



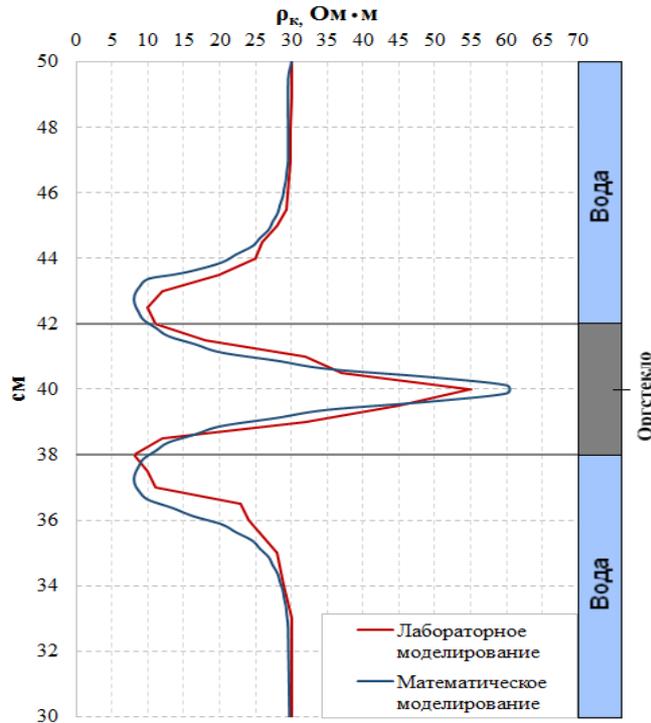
**Рис. 4.2.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 1 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=3000$  Ом·м)



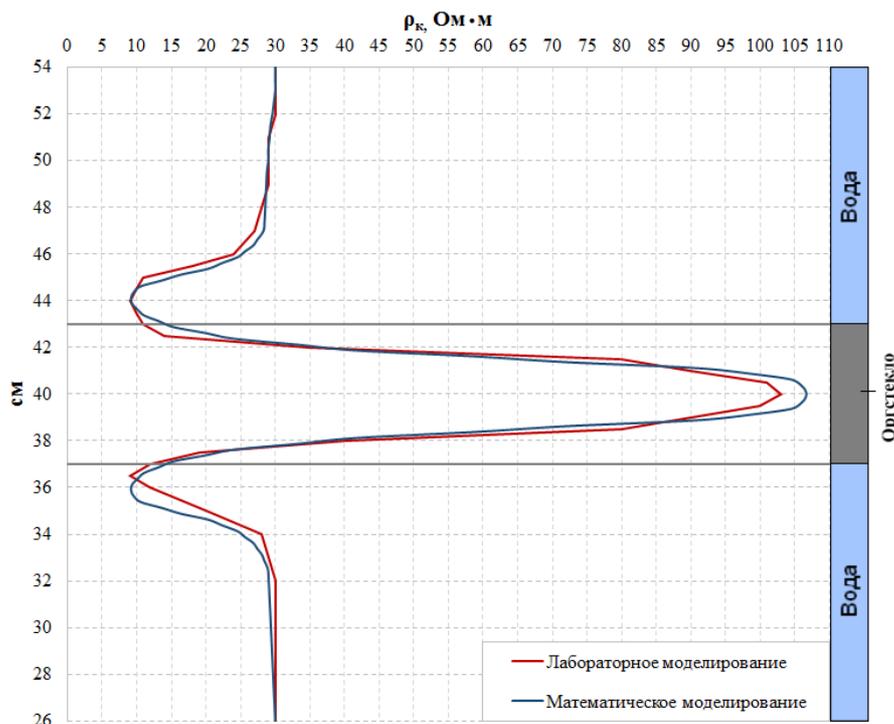
**Рис. 4.3. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 2 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=3000$  Ом·м)



**Рис. 4.4. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 4 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=3000$  Ом·м)



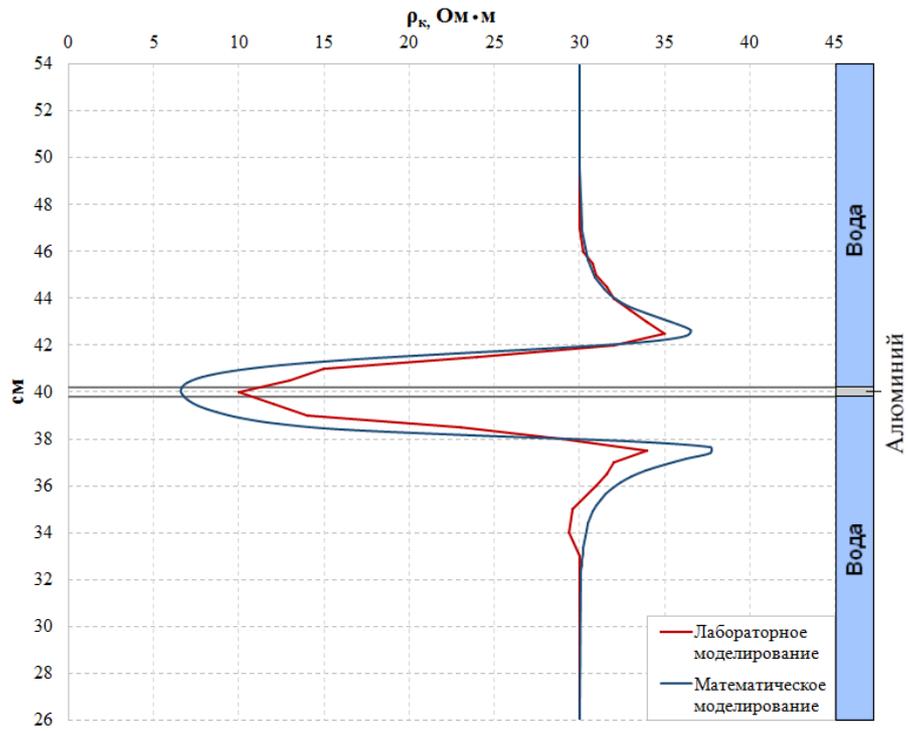
**Рис. 4.5. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 6 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_n=3000$  Ом·м)

На рис. 4.1 и рис. 4.2 видно, что пласт высокого удельного электрического сопротивления небольшой мощности (0,5-1 см) на записи характеризуется резким минимумом, ограниченным с двух сторон максимумами. При увеличении мощности пласта происходит изменение формы кривой. Когда  $H \geq L$  (рис. 4.4, рис. 4.5) модель пласта характеризуется на записи максимумом, симметричным относительно середины пласта, по краям которого расположены минимумы. На приведенных выше рисунках (рис. 4.1-4.5) видно, что экспериментальные и расчётные значения  $\rho_k$  ДОЗ против модели пласта имеют лишь небольшие различия.

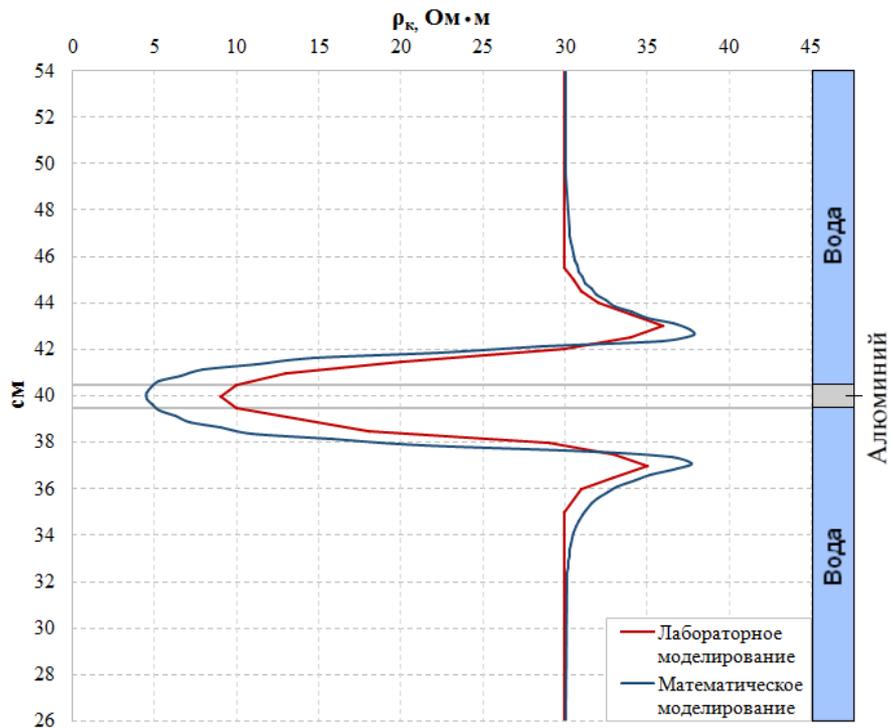
#### *Модель пласта низкого удельного электрического сопротивления*

Для моделирования пласта низкого удельного электрического сопротивления были применены слои алюминия (рис. 2.2, б). На рис. 4.6-4.9 показано сравнение результатов математических расчетов и данных лабораторных экспериментов, полученных макетом дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для моделей пластов низкого удельного электрического сопротивления различной мощности.



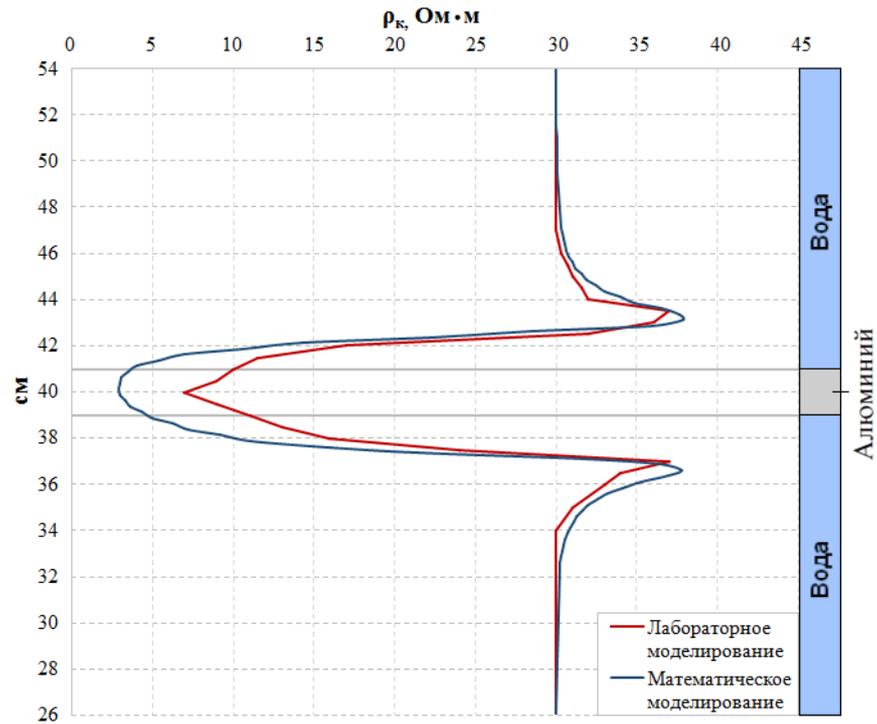
**Рис. 4.6.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 0,4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м)



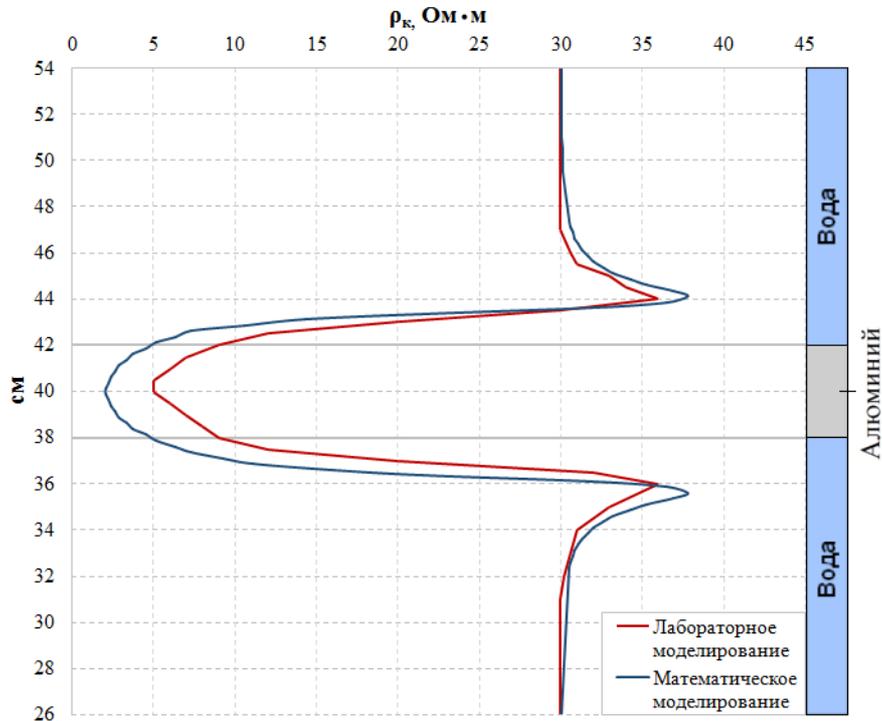
**Рис. 4.7.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 1 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м)



**Рис. 4.8.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 2 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м)



**Рис. 4.9.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м)

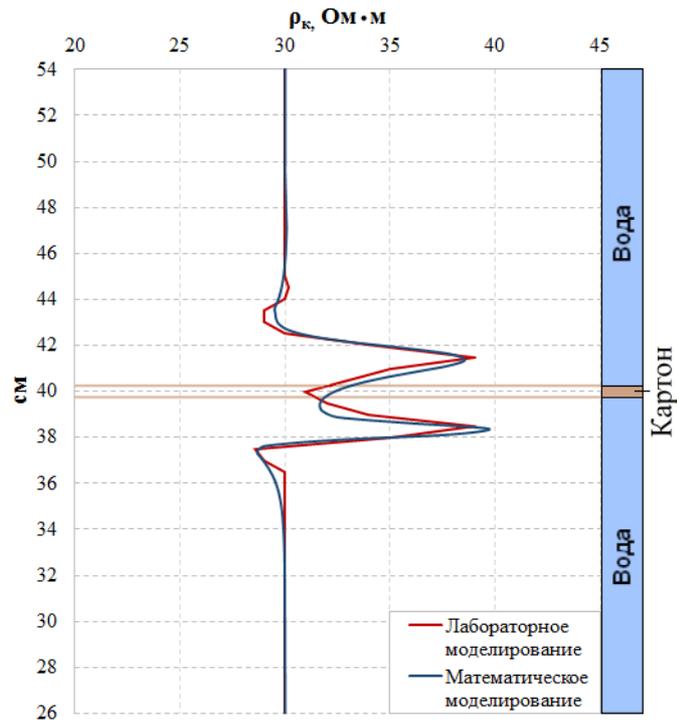
Данные математического и лабораторного моделирования, приведённые на рис. 4.6-4.9, показывают, что пласт низкого удельного электрического сопротивления на записи отмечен глубоким минимумом, симметричным относительно середины пласта. Некоторое различие результатов математического и лабораторного моделирования в этом случае может быть вызвано неполным совпадением параметров расчётной и фактической модели пласта.

#### *Модель пласта с низким значением коэффициента анизотропии*

Для моделирования пласта с низким значением коэффициента анизотропии были применены слои картона (рис. 2.2, в). На первых этапах лабораторного моделирования предполагалось, что картон изотропен, однако в результате проведения экспериментов было установлено, что при длительном нахождении в воде происходит изменение его структуры, и материал проявляет анизотропные свойства. Результаты лабораторного моделирования, приведенные ниже, были получены при непродолжительном взаимодействии картона с водой.

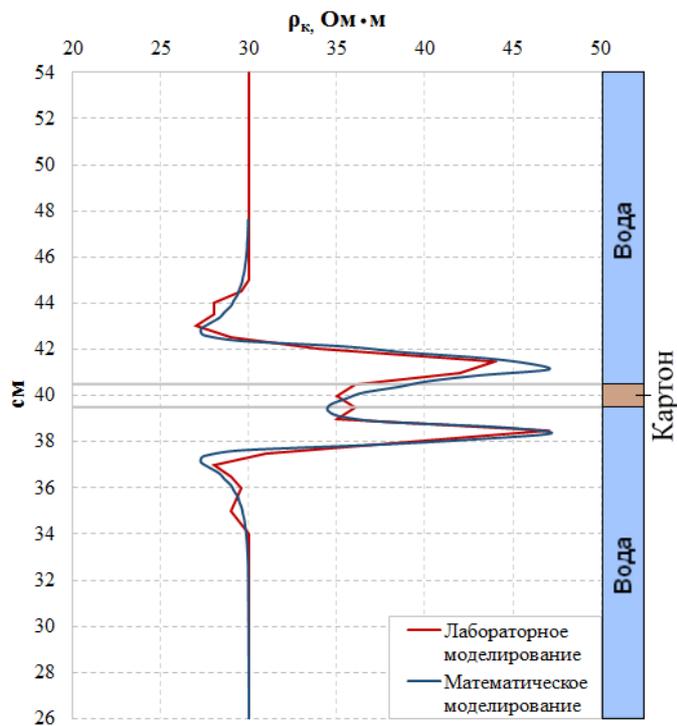
Для уточнения значения продольного и поперечного удельного электрического сопротивления картона после каждого эксперимента были проведены измерения на образце картона (подробно описанные в разделе 2.4). Полученные результаты измерения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  образца картона учитывались при проведении математического моделирования.

На рис. 4.10-4.15 приведено сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для моделей пластов, изготовленных из картона. Мощность модели пласта в приведённых результатах составляла: 0,5 см; 1 см; 2 см; 4 см; 5 см; 6 см. Коэффициент анизотропии, полученный в результате измерений  $\rho_t$  и  $\rho_n$  образца картона из которого были изготовлены модели пласта, изменялся в диапазоне от 1,1 до 1,13.



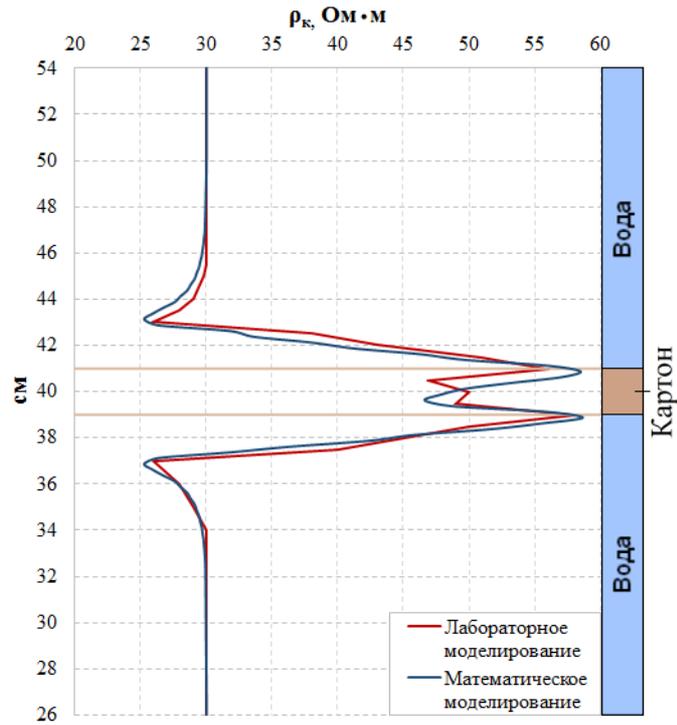
**Рис. 4.10.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 0,5 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм} = 30$  Ом·м,  $\rho_c = 30$  Ом·м,  $\rho_n = 150$  Ом·м)



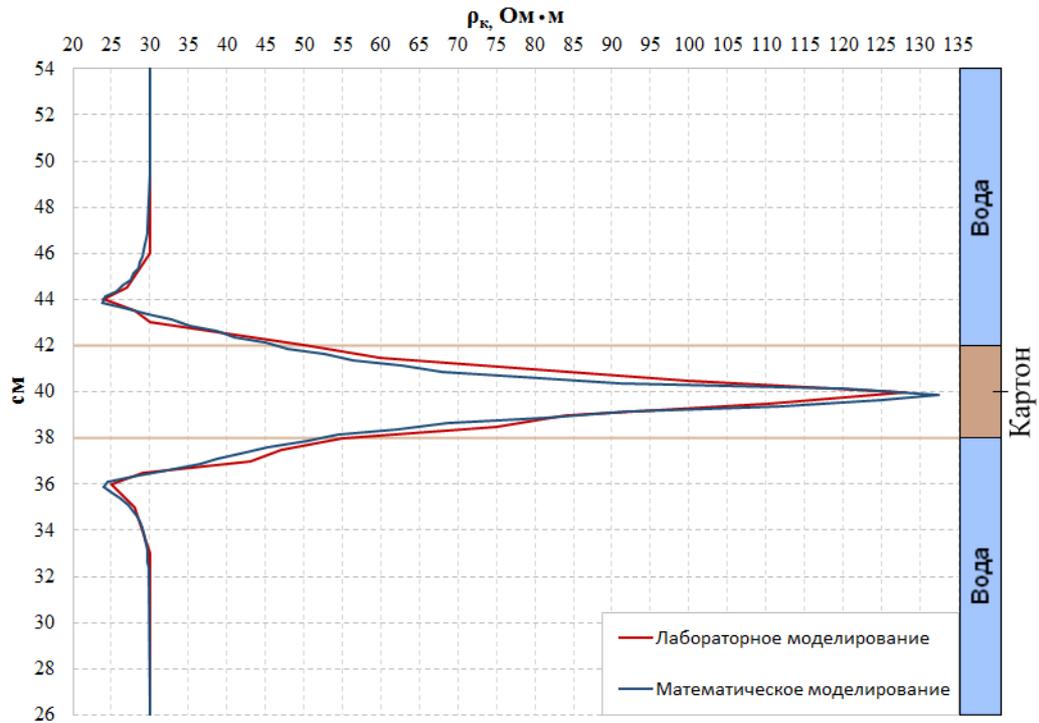
**Рис. 4.11.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 1 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм} = 30$  Ом·м,  $\rho_c = 30$  Ом·м,  $\rho_n = 150$  Ом·м)



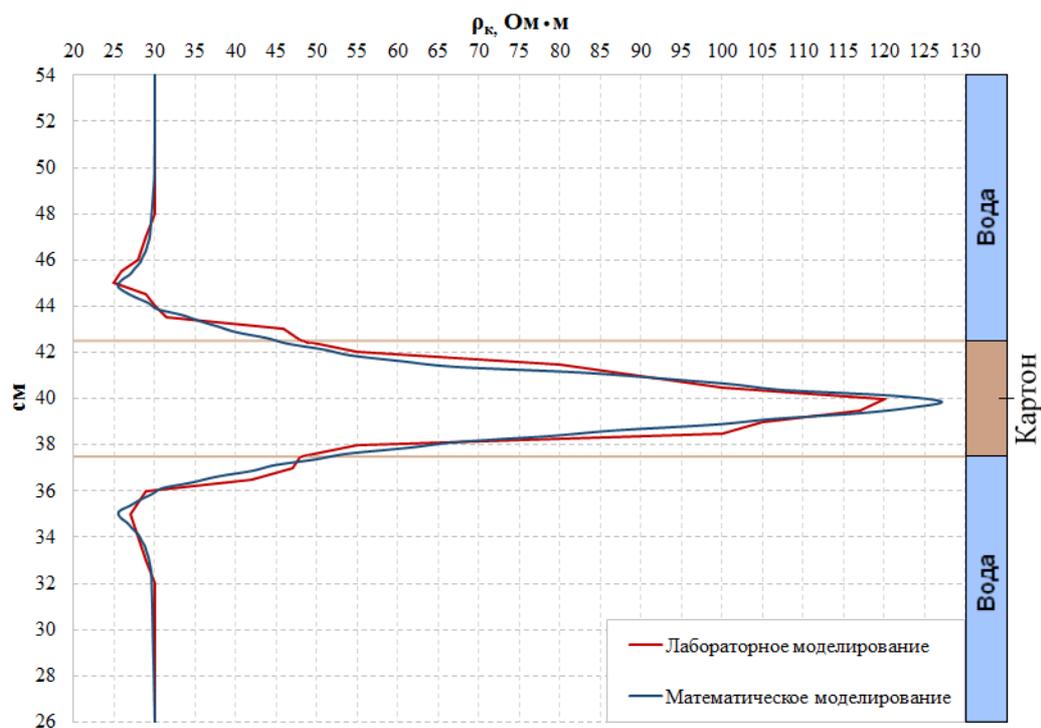
**Рис. 4.12. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 2 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_n=150$  Ом·м)



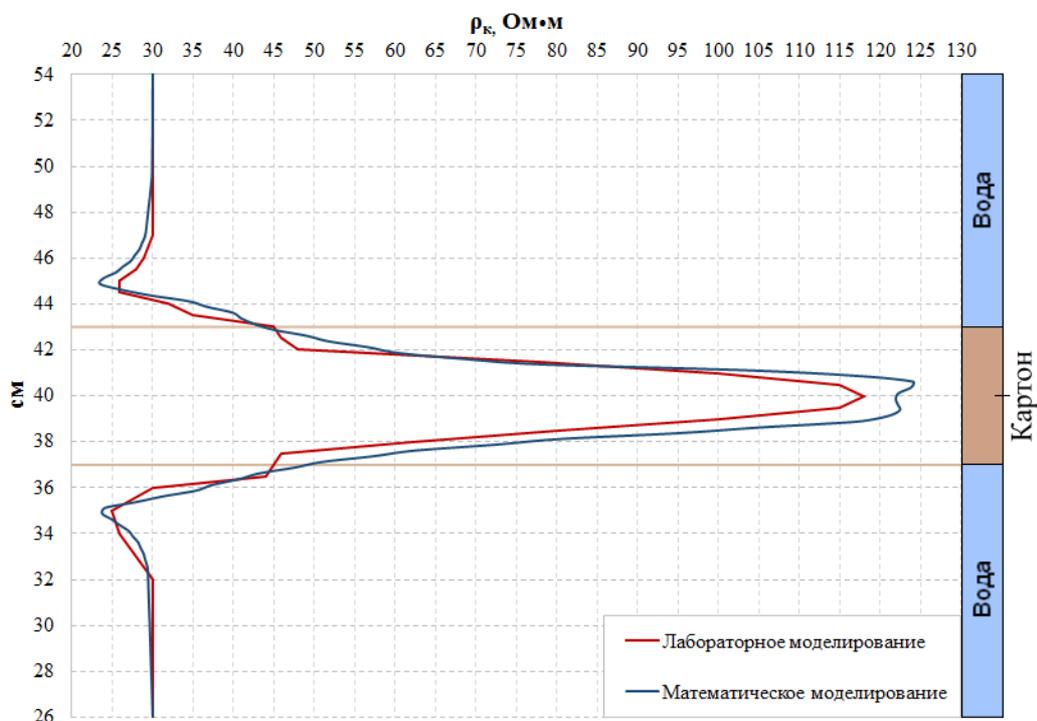
**Рис. 4.13. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 4 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_n=150$  Ом·м)



**Рис. 4.14. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 5 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{п}=150$  Ом·м)



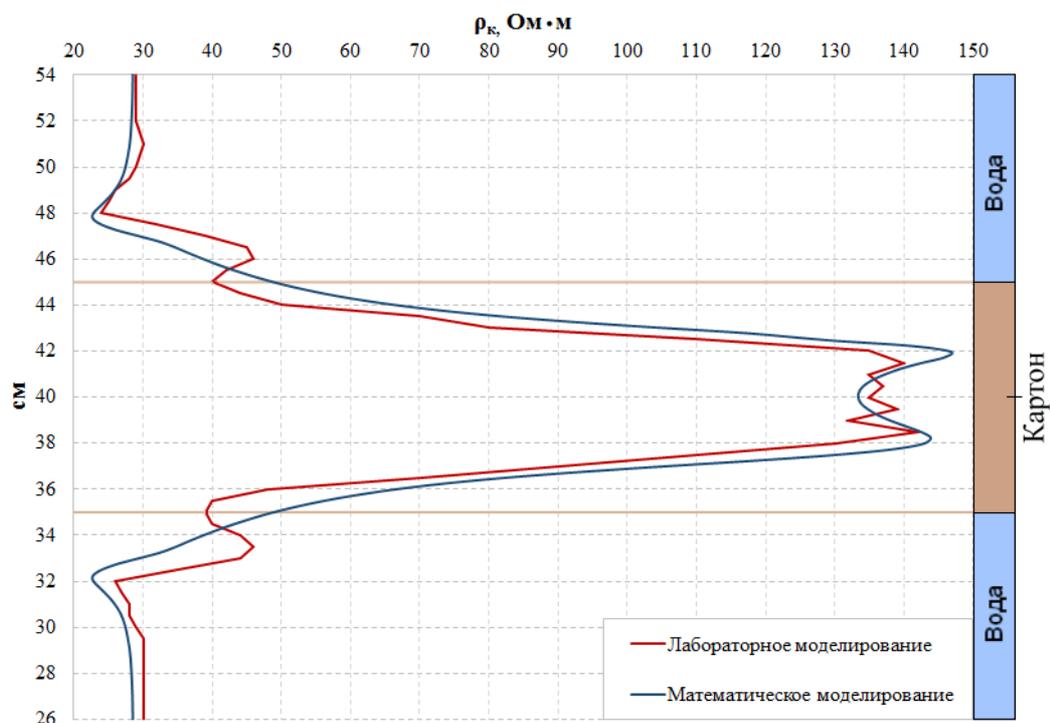
**Рис. 4.15. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 6 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{п}=150$  Ом·м)

На рис. 4.10-4.12 видно, что против модели пласта небольшой мощности (0,5-2 см) кривая  $\rho_k$  подобна по форме тем, которые были приведены выше для моделей пластов из оргстекла (рис. 4.1-4.3). При увеличении мощности пласта происходит изменение формы кривой  $\rho_k$ . В случае, когда  $H \geq L$  (рис. 4.13-4.15), против пласта на кривой имеется симметричный относительно середины пласта максимум, ограниченный по краям минимумами. Из приведённых результатов видно, что данные лабораторного и математического моделирования имеют небольшие различия. Как уже было отмечено, такие различия между экспериментальными и расчётными кривыми могут быть обусловлены не полной идентичностью моделей среды и зондов при физическом и математическом моделировании. В частности, математическое моделирование для дипольных зондов каротажа КС было проведено для точечных электродов  $A, B, M, N$ , а при физическом моделировании эти электроды, разумеется, имели конечные размеры.

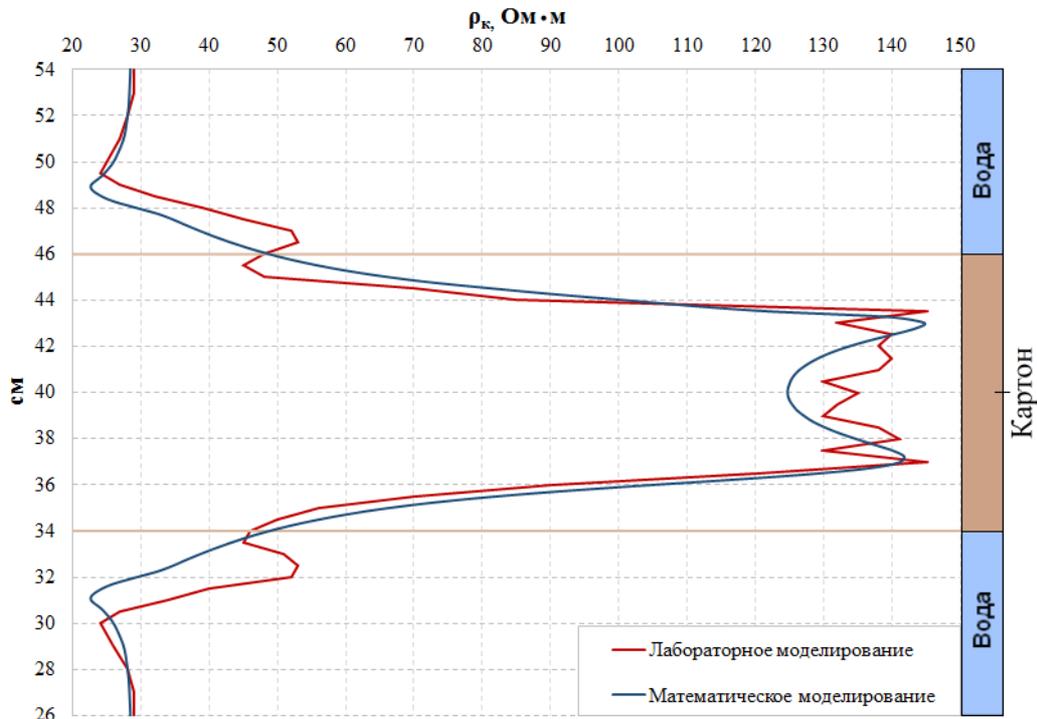
При лабораторном моделировании ДОЗ были получены результаты для моделей пластов из картона мощностью 10 см и более. Ниже приведены результаты математического и лабораторного моделирования макета ДОЗ А1В3М1N для моделей таких пластов.

На рис. 4.16-4.19 видно, что форма кривой против модели пласта осложнена множеством минимумов и максимумов. Расхождение результатов математического и лабораторного моделирования в этом случае могут быть вызваны следующим. При изготовлении модели пласта большой мощности было сложно равномерно расположить отдельные слои картона в лабораторной установке, что, в свою очередь, приводило к появлению неоднородностей, поэтому экспериментальная кривая  $\rho_k$  напротив середины модели пласта имеет изрезанную форму. Кроме указанной выше причины подобное поведение кривой может быть вызвано отклонением макета зонда от оси скважины (ось  $Z$ ), так как в пластах большой мощности, точное центрирование зонда было проблематичным.



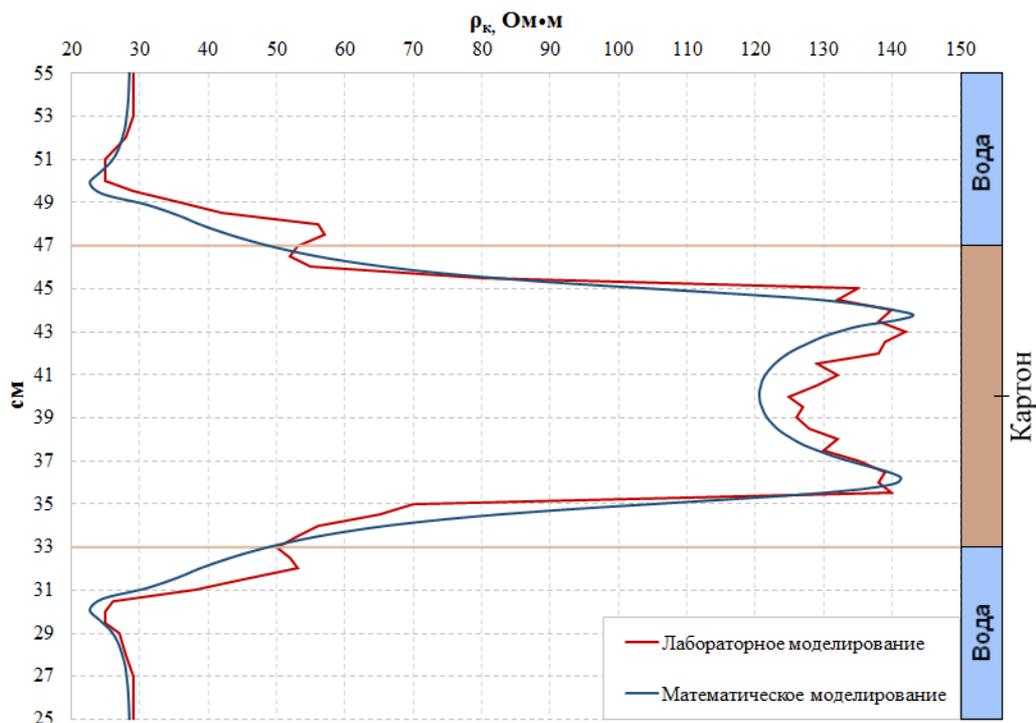
**Рис. 4.16. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В3М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_n=150$  Ом·м)



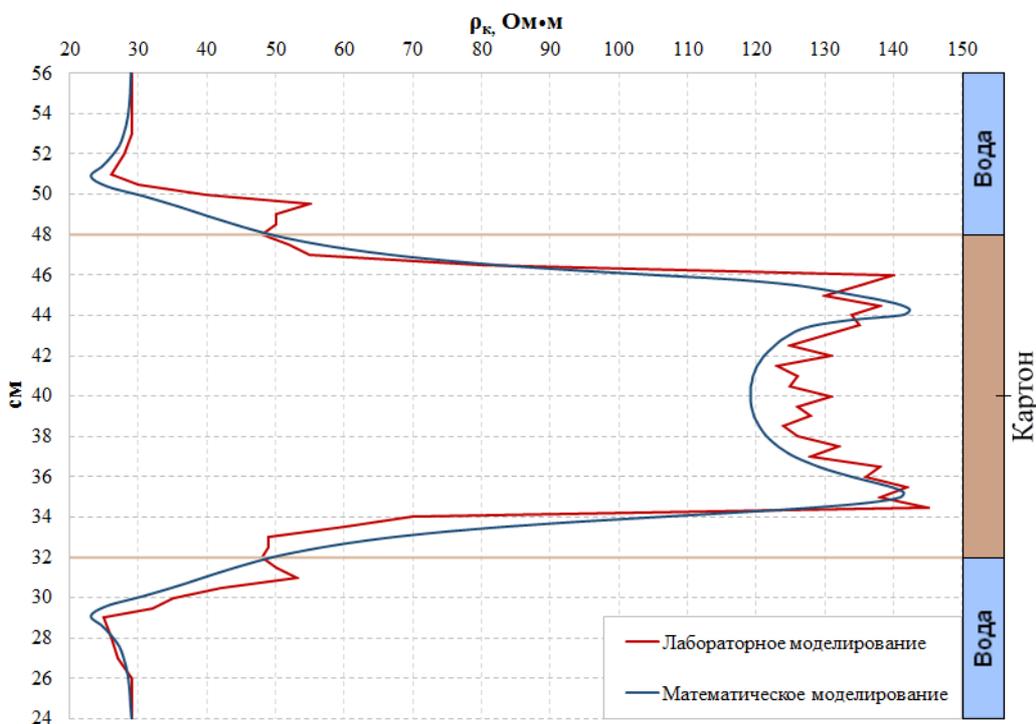
**Рис. 4.17. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В3М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 12 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_n=150$  Ом·м)



**Рис. 4.18. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В3М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 14 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=150$  Ом·м)



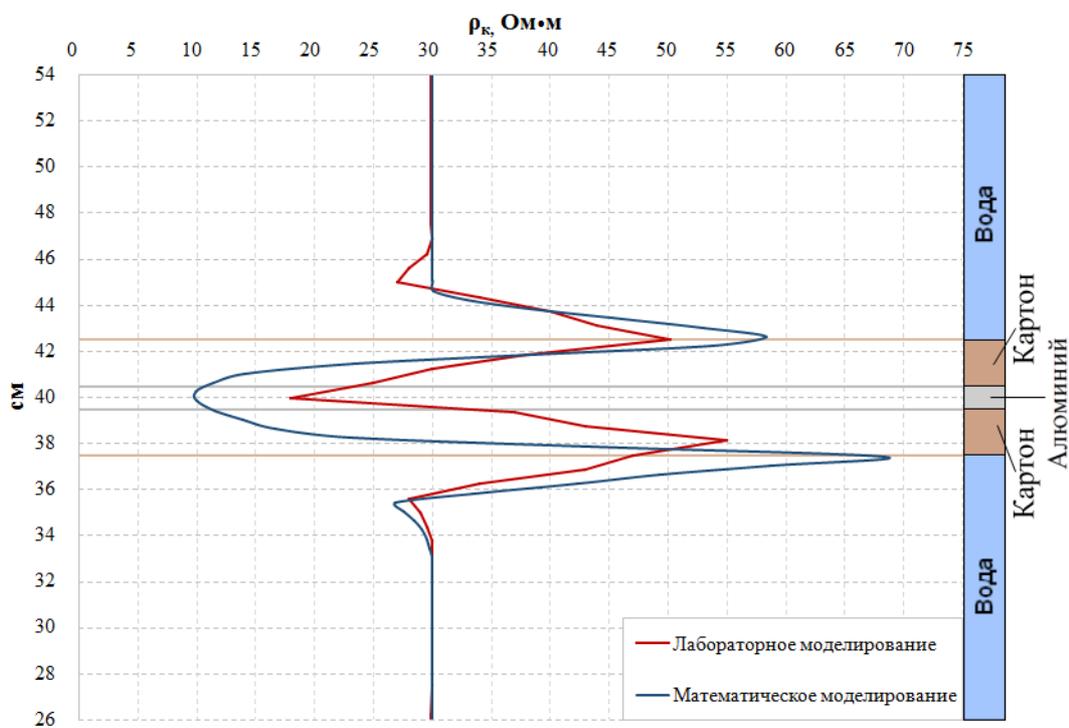
**Рис. 4.19. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В3М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 16 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30$  Ом·м,  $\rho_c \approx 30$  Ом·м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30$  Ом·м,  $\rho_c=30$  Ом·м,  $\rho_{\text{п}}=150$  Ом·м)

*Модель пласта, состоящая из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями*

Для моделирования таких типов пластов были применены слои материалов с существенно различающимися значениями удельного электрического сопротивления (оргстекло, алюминий, картон). Кроме различия по удельному электрическому сопротивлению, составленные из слоев прослойки имели разную мощность в составе модели пласта.

Ниже приведены результаты лабораторного и математического моделирования дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N в моделях таких пластов разной мощности.

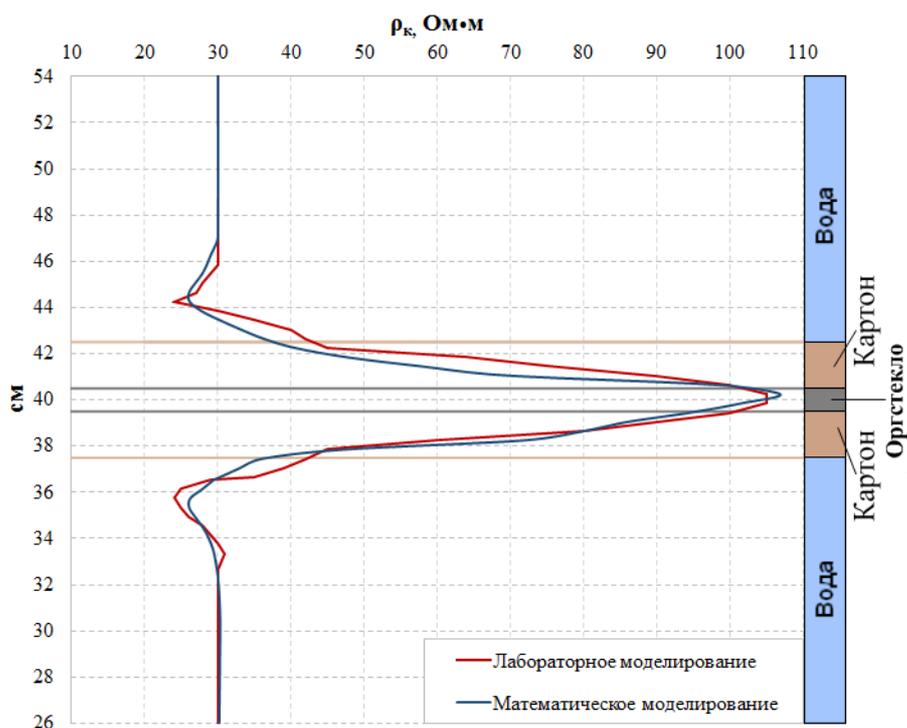


**Рис. 4.20.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

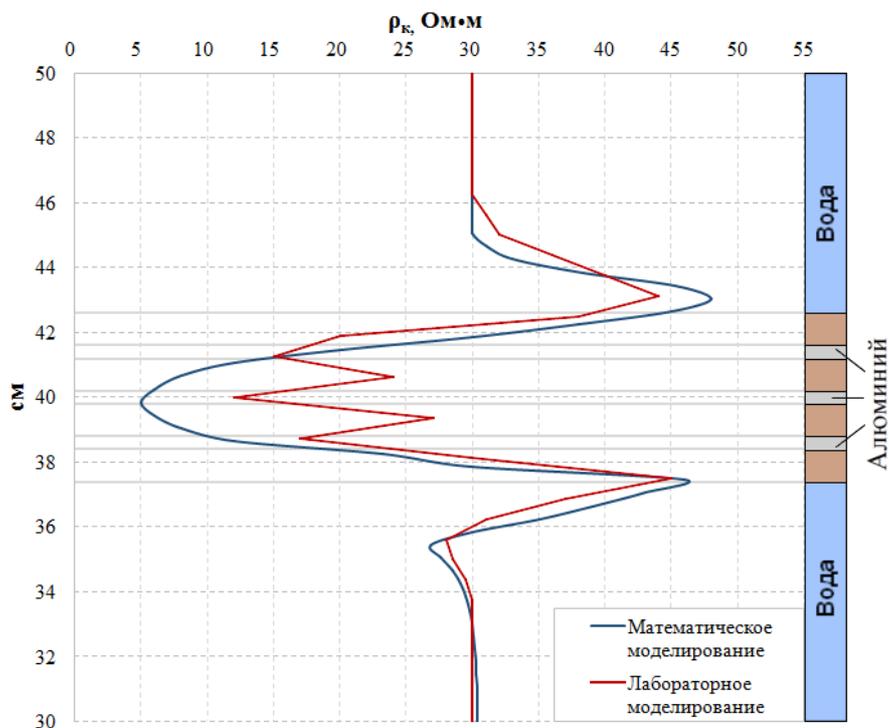
$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

(при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_c=30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_{\text{картона}}=150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_{\text{алюминия}}=2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )



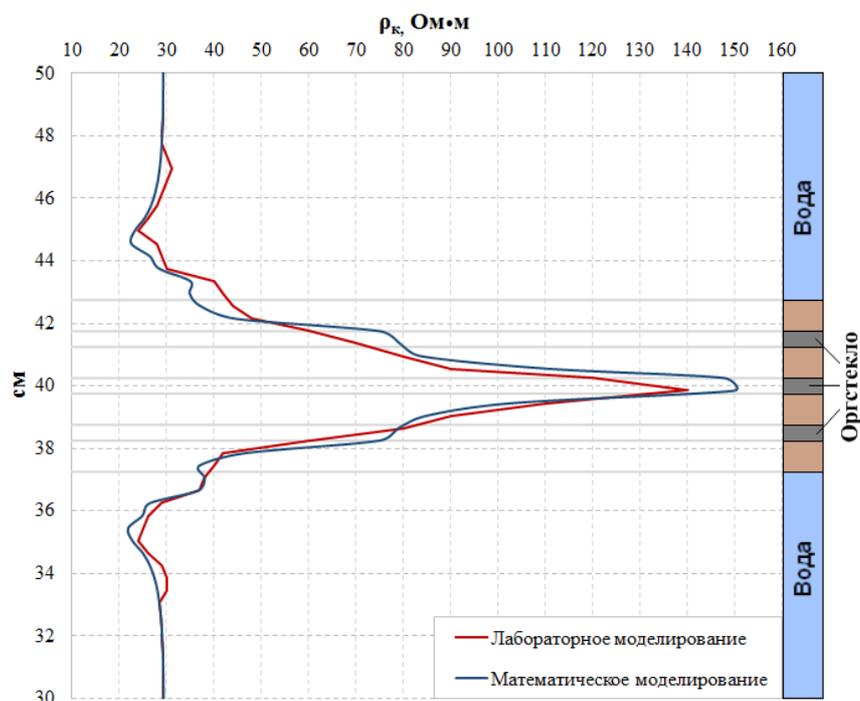
**Рис. 4.21. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5 см).**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx \rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}} = \rho_c = 30$  Ом•м,  $\rho_{\text{картона}} = 150$  Ом•м,  $\rho_{\text{оргстекла}} = 3000$  Ом•м)



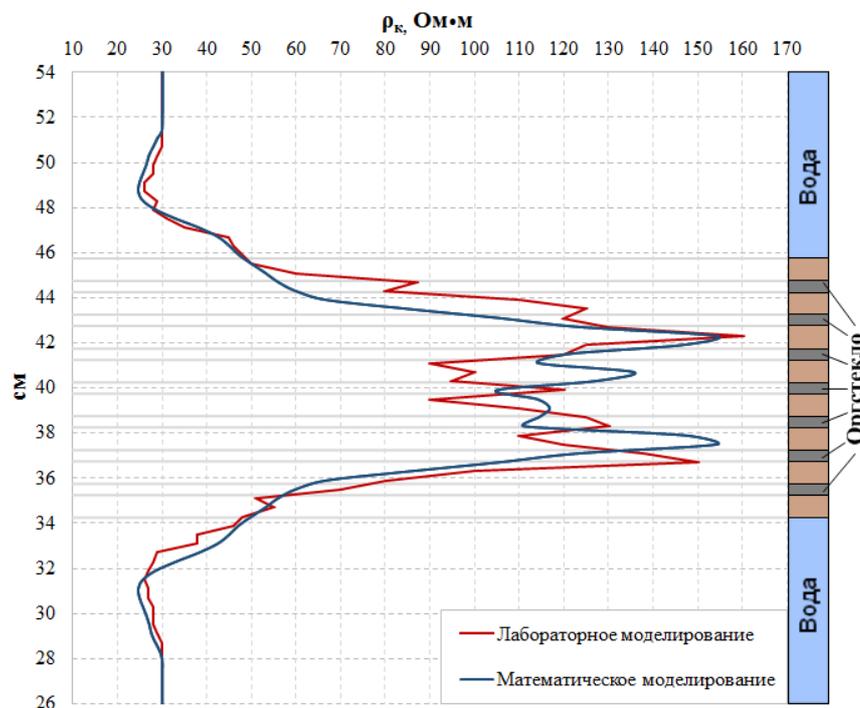
**Рис. 4.22. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5,2 см).**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx \rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}} = \rho_c = 30$  Ом•м,  $\rho_{\text{картона}} = 150$  Ом•м,  $\rho_{\text{алюминия}} = 2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом•м)



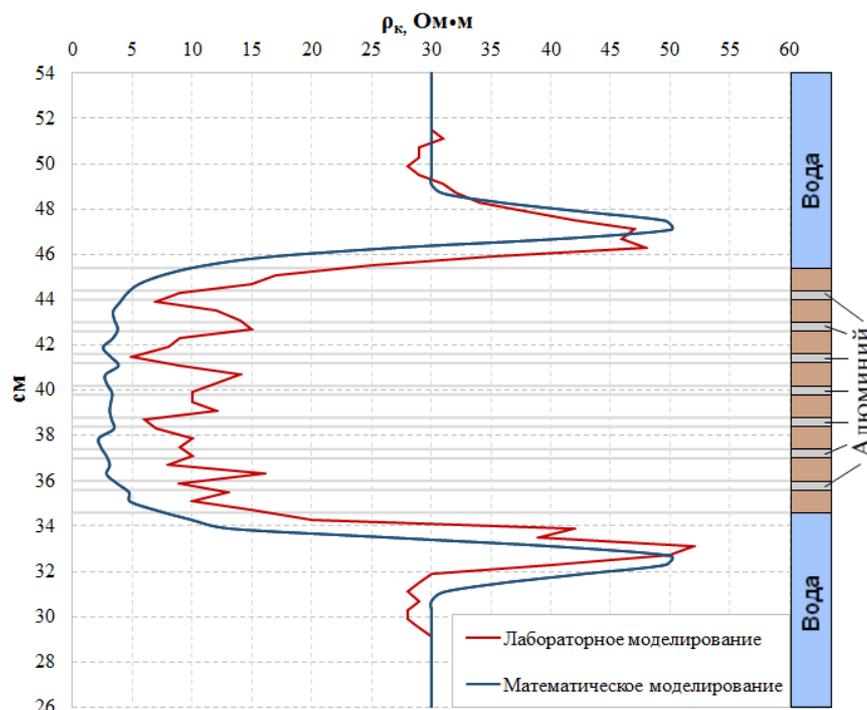
**Рис. 4.23.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5,5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx \rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}} = \rho_c = 30$  Ом•м,  $\rho_{\text{картона}} = 150$  Ом•м,  $\rho_{\text{оргстекла}} = 3000$  Ом•м)



**Рис. 4.24.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 11,5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{\text{вм}} \approx \rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}} = \rho_c = 30$  Ом•м,  $\rho_{\text{картона}} = 150$  Ом•м,  $\rho_{\text{оргстекла}} = 3000$  Ом•м)



**Рис. 4.25.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 10,8 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx \rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм} = \rho_c = 30$  Ом•м,  $\rho_{картона} = 150$  Ом•м,  $\rho_{алюминия} = 2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом•м)

На рис.4.20-4.23 видно, что при небольшой мощности модели пласта результаты математического и лабораторного моделирования имеют незначительные различия. В случае моделей пластов большой мощности (рис.4.24-4.25) некоторые различия в экспериментальных и расчётных данных можно объяснить неоднородностью модели пласта и неточностями центрирования макета зонда.

Из приведённых результатов видно, что в большинстве случаев, экспериментальные и расчётные значения  $\rho_k$  ДОЗ для различных моделей пластов имеют несущественные отличия. Такой результат был достигнут при помощи проведения многократных повторных измерений, а также путём уточнения параметров моделей пластов, применяемых при математическом моделировании.

Кроме приведённых результатов, в рамках исследования были получены результаты лабораторного моделирования макетов ДОЗ с разными расстояниями между электродами и положением токовых и измерительных

электродов (M1N3A1B, M0,5N3A0,5B, A1B4M1N, M1N4A1B, A0,5B4M0,5N, M0,5N4A0,5B) в аналогичных моделях пластов, в том числе и для макетов ДОЗ, на результаты измерений которых оказывает влияние корпус лабораторной установки (A1B5M1N, M1N5A1B, A0,5B5M0,5N, M0,5N5A0,5B, A1B6M1N, M1N6A1B, A0,5B6M0,5N, M0,5N6A0,5B, A1B7M1N, M1N7A1B, A2B7M2N, M2N7A2B, A1B8M1N, M1N8A1B, A2B8M2N, M2N8A2B)

На основании сопоставления данных лабораторного и математического моделирования можно сделать вывод о корректной работе измерительной аппаратуры и незначительном влиянии электромагнитных помех на результаты, полученные при физическом моделировании.

#### **4.2. Результаты лабораторного моделирования осевых зондов с тороидальными антеннами.**

Первые результаты лабораторного моделирования зондов с тороидальными антеннами, как и для дипольно-осевых зондов каротажа КС, были получены в однородно-изотропной модели среды (рис. 2.15). Полученные данные показали существенное влияние электромагнитных помех на результаты измерений и на необходимость принятия мер по их устранению.

Для сопоставления результатов измерений, полученных зондами с тороидальными антеннами (ТОЗ) и дипольно-осевыми зондами (ДОЗ) каротажа КС, были изготовлены макеты таких зондов одинаковой длины. Для перехода от сигнала в приёмной антенне ТОЗ к значению  $\rho_k$  служил экспериментально полученный коэффициент. Лабораторные эксперименты с ТОЗ были проведены для пластов высокого удельного электрического сопротивления, низкого удельного электрического сопротивления и пластов с низким значением коэффициента анизотропии.

Ниже приведено сопоставление результатов физического моделирования, полученных осевым зондом с тороидальными антеннами ( $L=4$  см) и дипольно-осевым зондом A0,5B3M0,5N для различных по удельному электрическому сопротивлению моделей пласта.

Модель пласта высокого удельного электрического сопротивления

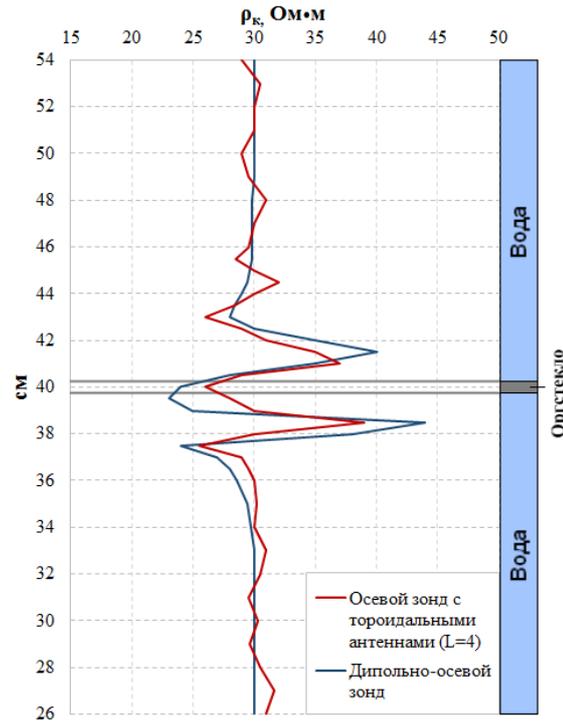


Рис. 4.26. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 0,5 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

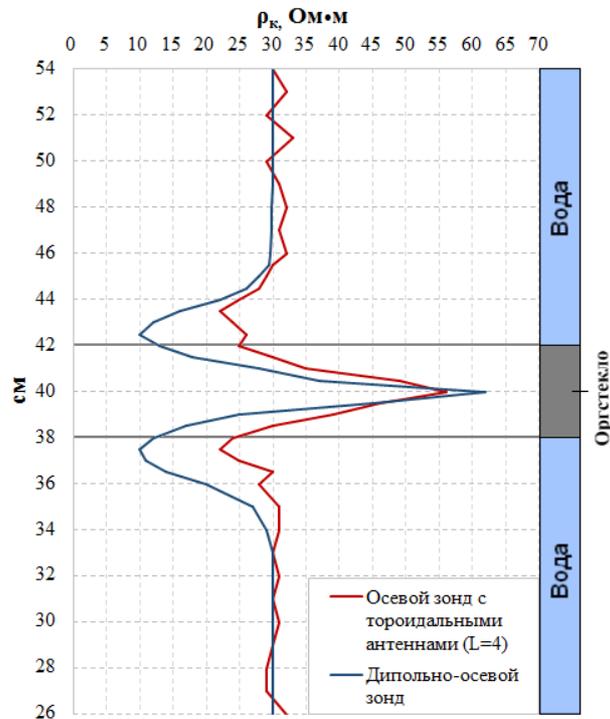


Рис. 4.27. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Модель пласта низкого удельного электрического сопротивления

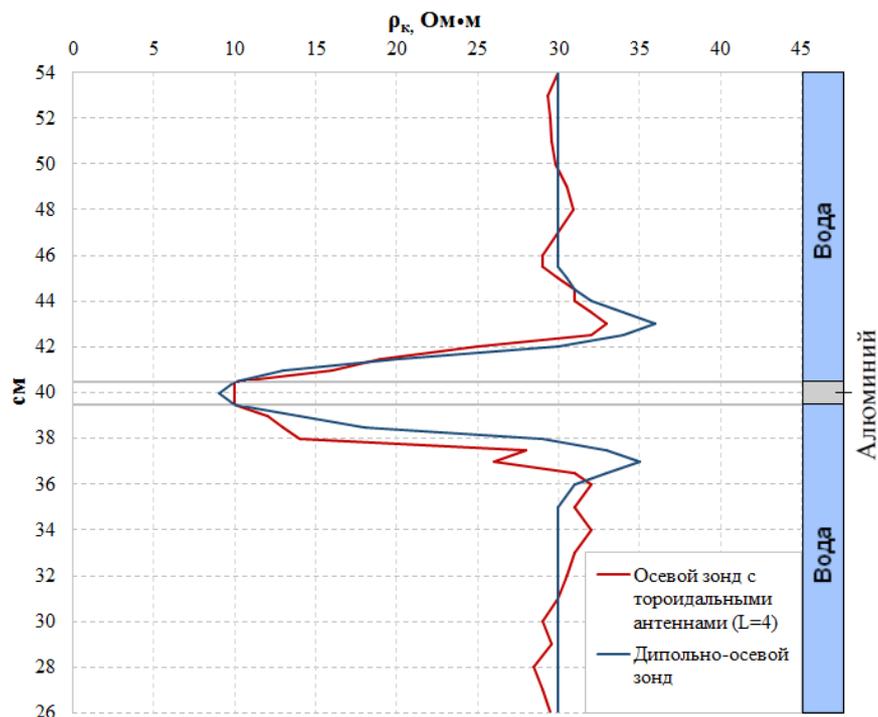


Рис. 4.28. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 1 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

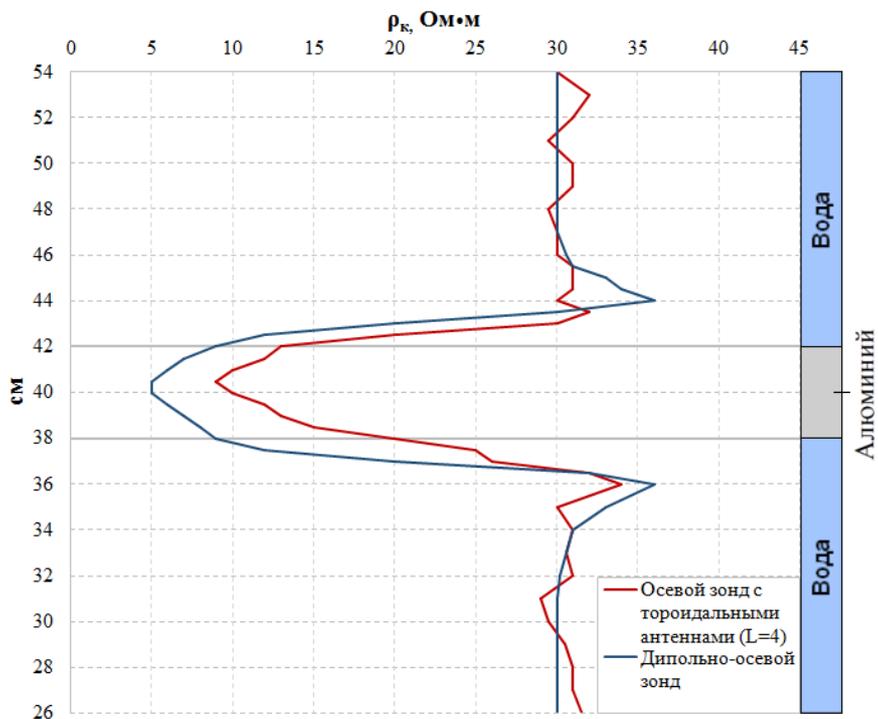


Рис. 4.29. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Модель пласта с низким значением коэффициента анизотропии

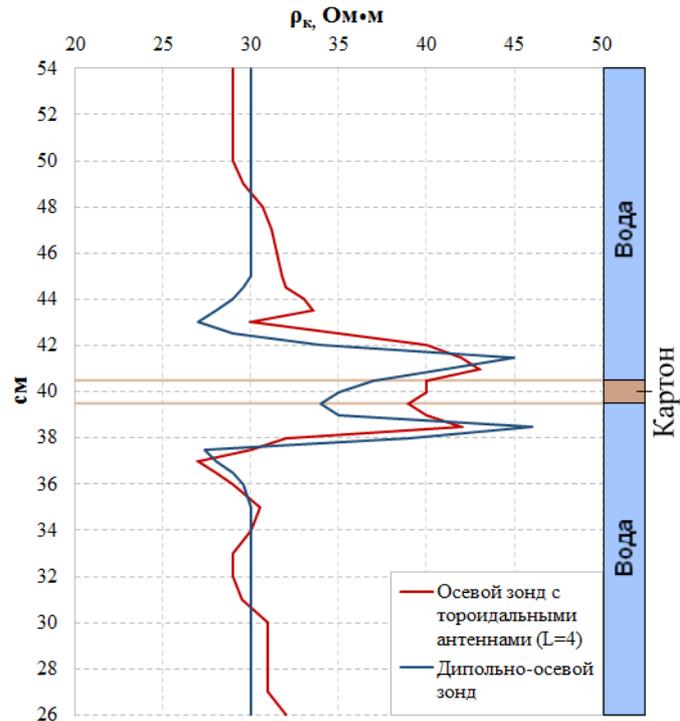


Рис. 4.30. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 1 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

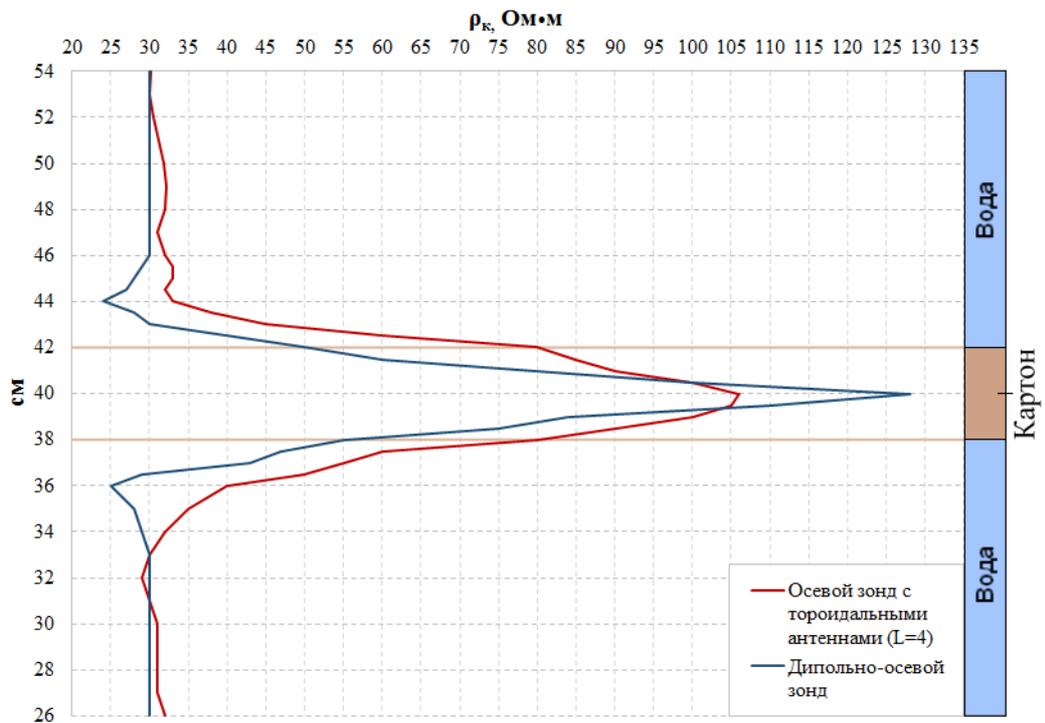


Рис. 4.31. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ( $L=4$ ) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_{\text{с}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

К сожалению, экспериментально не было получено результатов для моделей пластов большой мощности (более 6 см). Причиной этому явились сложности в проведении экспериментов.

На приведённых выше рисунках видно, что кривая, полученная осевым зондом с тороидальными антеннами, в большинстве случаев осложнена максимумами и минимумами, не связанными с влиянием модели среды. Такое поведение кривой вызвано влиянием электромагнитных помех. Для их снижения были приняты меры, описанные в главе 2.4, однако полностью исключить их не удалось. Различия в формах кривых напротив модели пласта, кроме влияния электромагнитных помех, могут быть вызваны неточностями центрирования зонда с тороидальными антеннами, незначительным изменением его геометрии и неполным совпадением с характеристиками дипольно-осевого зонда.

При лабораторном моделировании были проведены измерения макетами осевых зондов с тороидальными антеннами другой длины (3 см, 5 см, 6 см). Однако из-за влияния электромагнитных помех возникали сложности интерпретации полученных результатов, и требовалось проведение многократных повторных измерений.

Несмотря на перечисленные выше факторы, по данным, полученным осевыми зондами с тороидальными антеннами и дипольно-осевыми зондами в различных моделях пластов, можно сделать вывод о том, что при расположении зондов в скважине параметры окружающей скважину среды будут оказывать одинаковое влияние на результаты измерений этих зондов.

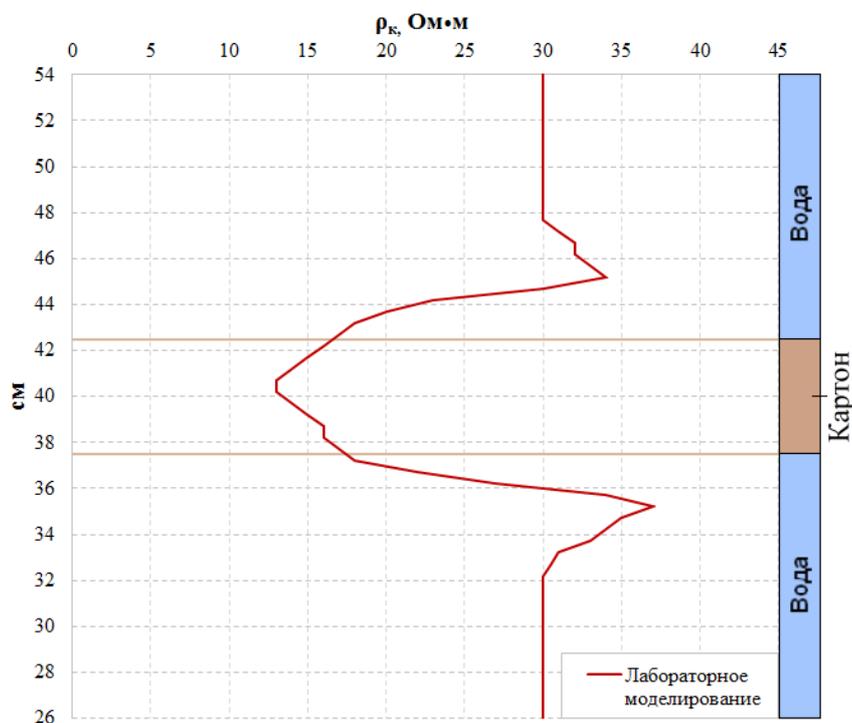
#### **4.3. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториальных зондов.**

При лабораторном моделировании дипольно-экваториальных зондов измерения были проведены только в моделях анизотропных пластов. Для исключения влияния корпуса лабораторной установки на результаты измерений было принято решения применять макеты зондов, длина которых менее 6 см, а

расстояние между парными электродами не более 1,5 см. К сожалению, в случае дипольно-экваториальных зондов не было возможности сопоставить результаты лабораторного моделирования с расчётными данными в силу сложности получения последних. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования дипольно-осевых зондов показало точность работы измерительной аппаратуры и отсутствия влияния электромагнитных помех. На этом основании можно сделать вывод о достоверности данных, полученных дипольно-экваториальными зондами.

Ниже приведены результаты лабораторного моделирования макета ДЭЗ ( $L=OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см, где  $L$  – длина зонда,  $OO'$  – расстояние между центрами токовых и измерительных диполей) для моделей анизотропных пластов различной мощности.

*Модель пласта с низким значением коэффициента анизотропии*



**Рис. 4.32.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 5 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

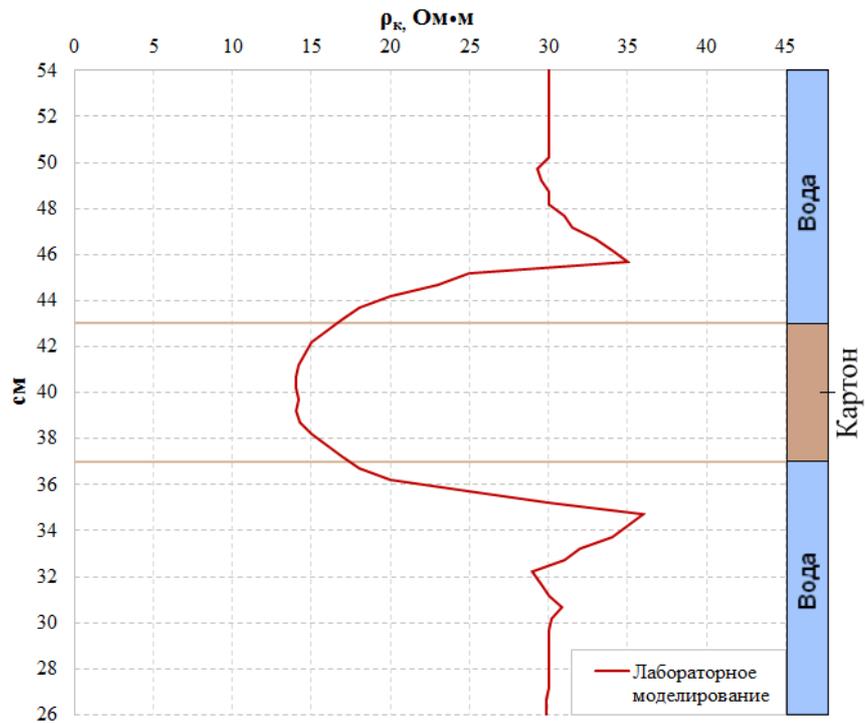


Рис. 4.33. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 6 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  
 $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м

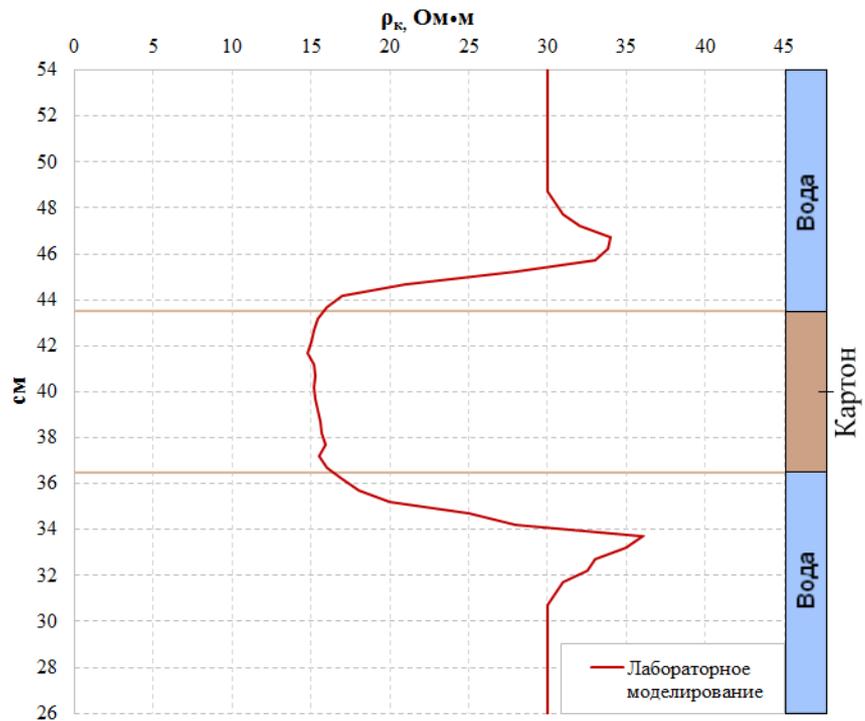
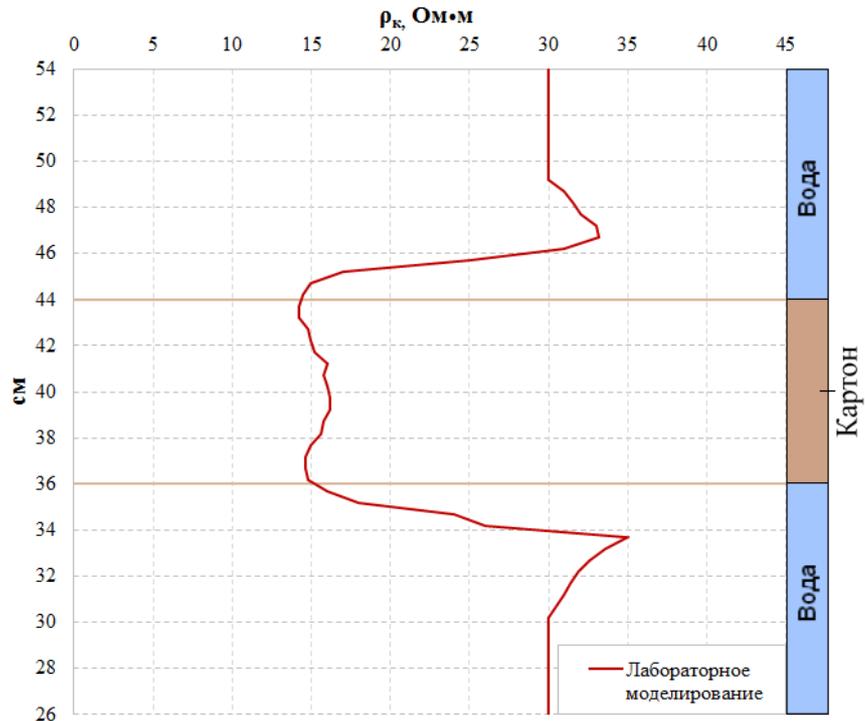


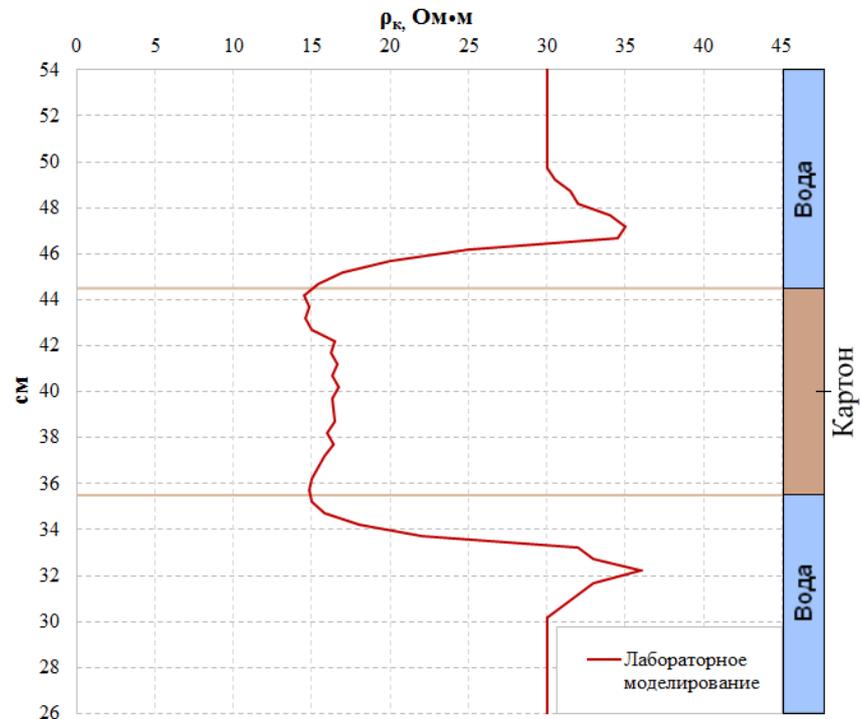
Рис. 4.34. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 7 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  
 $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м



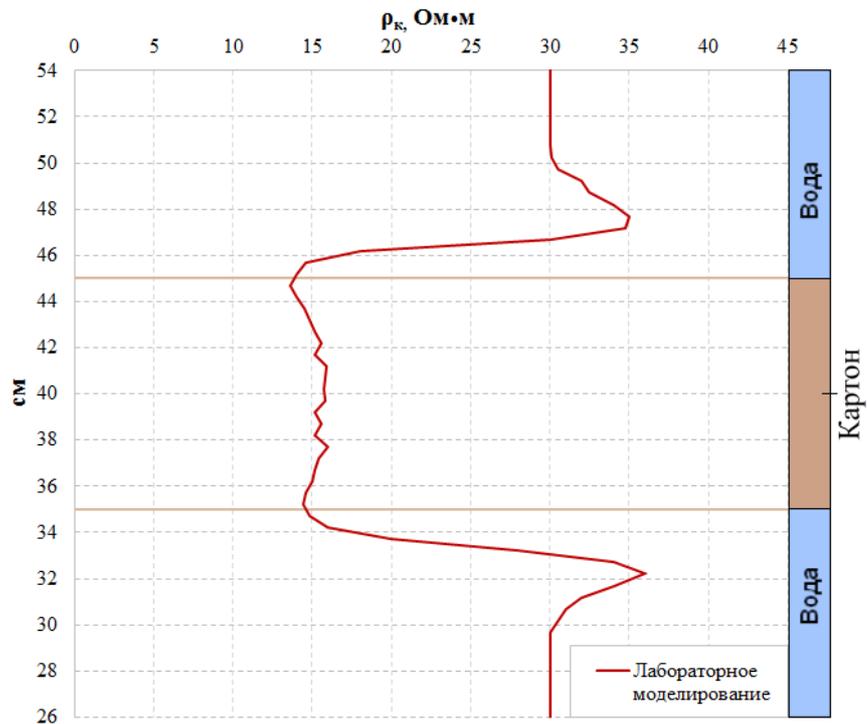
**Рис. 4.35.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 8 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  
 $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м



**Рис. 4.36.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 9 см.

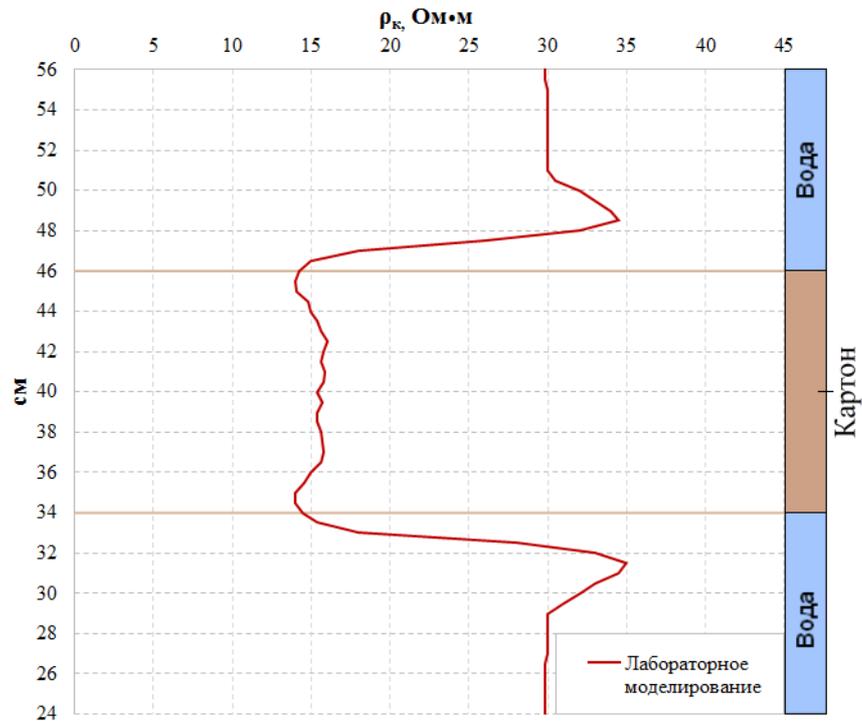
Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  
 $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м



**Рис. 4.37.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

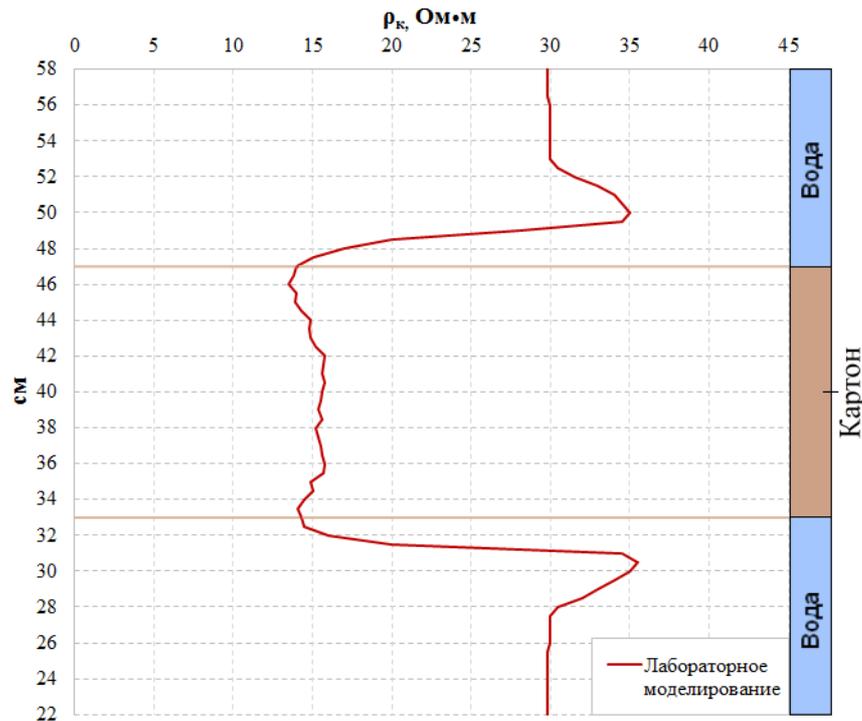
$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.38.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 12 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.39.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 14 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Из результатов лабораторного моделирования, приведенных на рис. 4.22-рис. 4.29, видно, что против моделей пройденных скважиной пластов с высокими значениями удельных электрических сопротивлений, по сравнению с  $\rho$  вмещающей их среды, были получены аномально низкие значения  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}$ . На основе математических расчётов было установлено, что такая нехарактерная для других зондов каротажа КС форма кривых  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}$  против пластов с высокими значениями  $\rho$  обусловлена особенностями распределения индуцированных на границе скважины зарядов (источников вторичного поля  $E^B$ ) при возбуждении первичного электрического поля  $E^П$  поперечным оси скважины электрическим диполем  $AB$  (зарядами электродов  $A, B$ ). Более подробно сказанное выше описано в работе [32].

Кроме слабо-анизотропных моделей пластов при лабораторном моделировании были получены результаты измерений дипольно-экваториальных зондов в пластах, состоящих из чередующихся слоев разного удельного электрического сопротивления.

Модель пласта, состоящая из чередующихся слоев с разным удельным электрическим сопротивлением

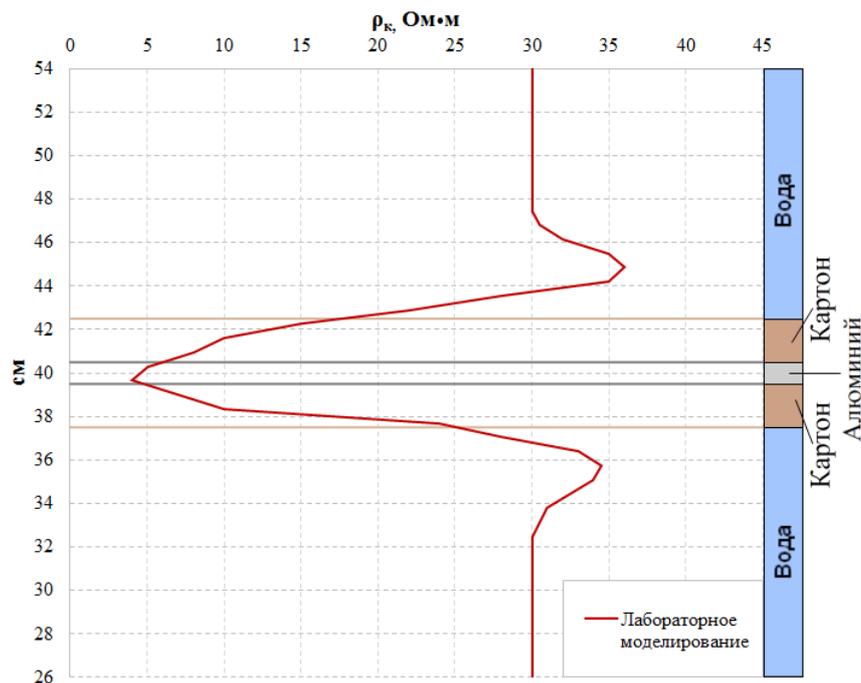


Рис. 4.40. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{вм} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

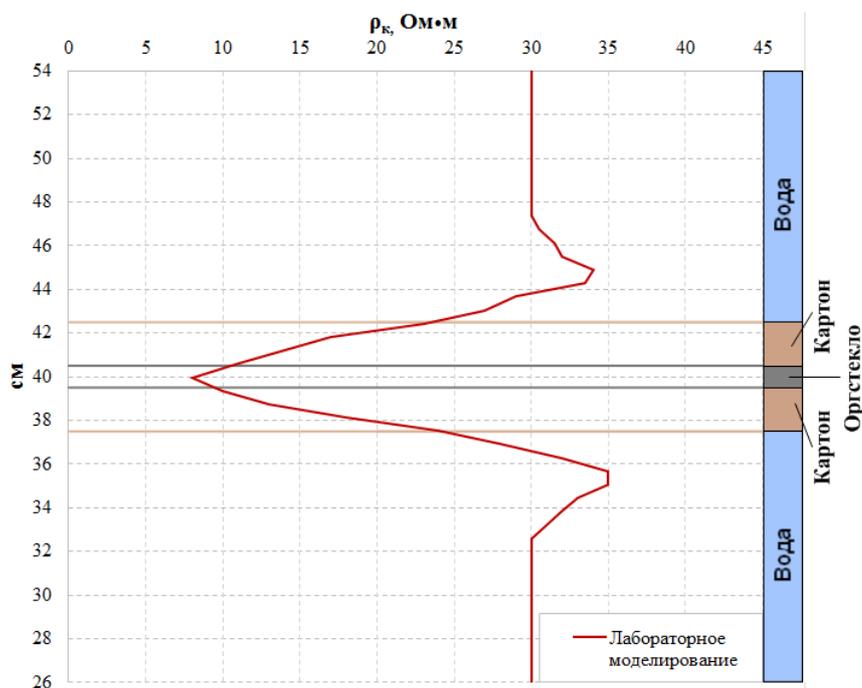
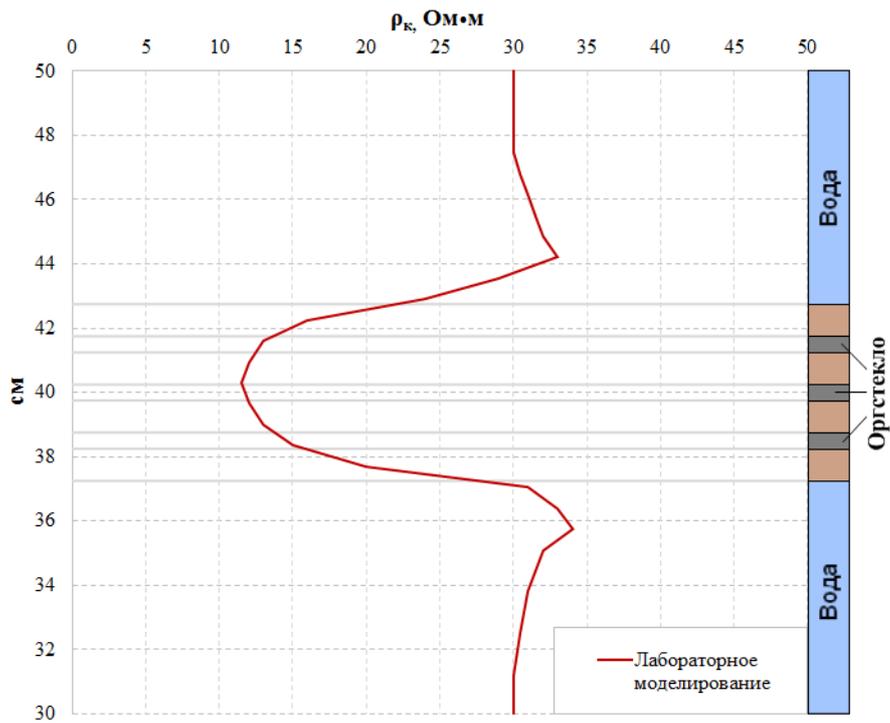


Рис. 4.41. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

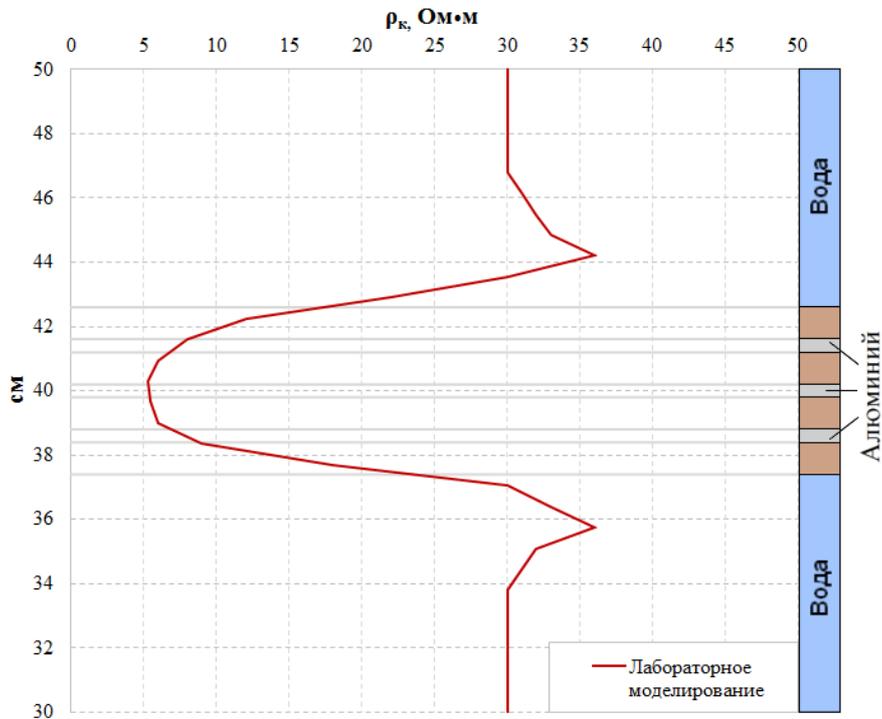
$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{вм} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.42.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5,5 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

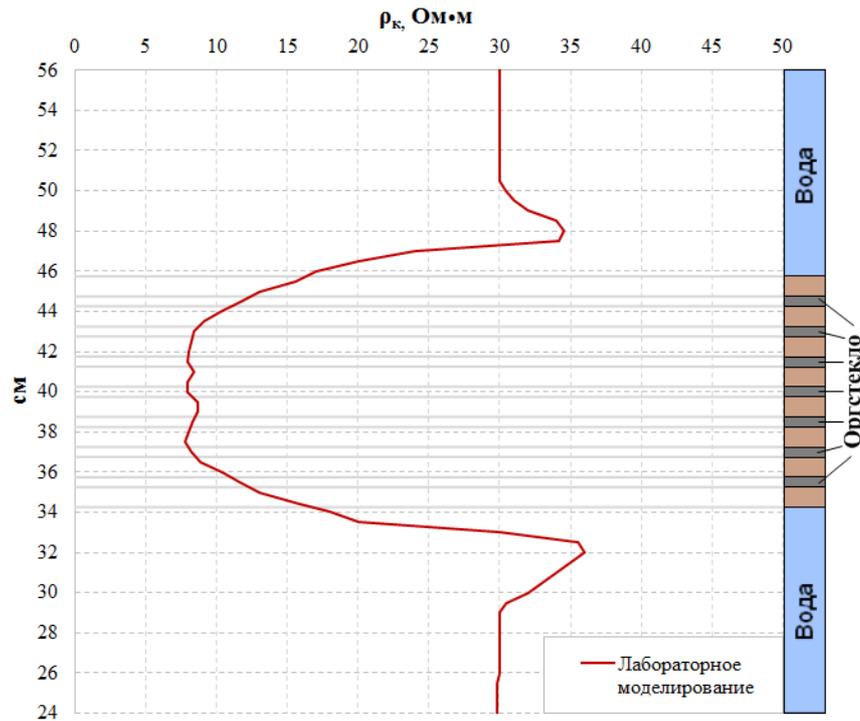
$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{вм} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.43.** Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 5,2 см).

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

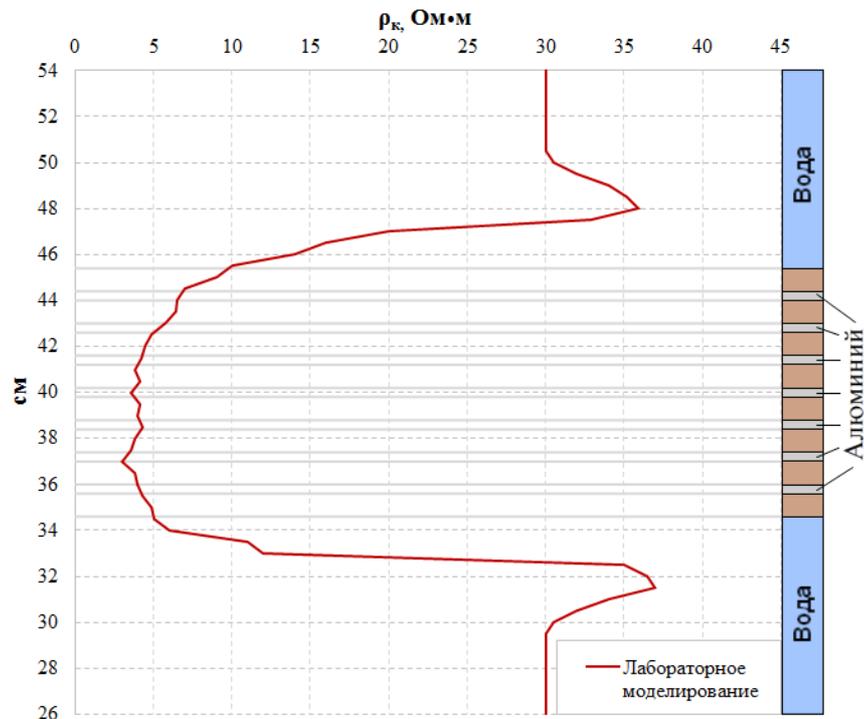
$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{вм} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.44. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 11,5 см).**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



**Рис. 4.45. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $OO'=5$  см,  $AB=1,2$  см,  $MN=1,2$  см) для модели пласта состоящей из чередующихся слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями (мощностью 10,8 см).**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Приведенные выше результаты лабораторного моделирования (рис. 4.40-4.45) показывают, что модели таких пластов характеризуются на записи более низкими значениями  $\rho_k^{ДЭЗ}$ , чем в случаи измерений в моделях слабо-анизотропных пластов.

### **Выводы.**

1. Лабораторное моделирование ДОЗ сопровождалось 2D-математическим моделированием ДОЗ. На основе сравнения экспериментальных и расчётных данных был сделан вывод о том, что электромагнитные помехи не оказывают существенного влияния на результаты измерений, полученных с дипольными зондами, а также о корректной работе измерительной аппаратуры.

2. При лабораторном моделировании зондов с тороидальными антеннами было выявлено существенное влияние электромагнитных помех на результаты измерений. В результате принятых мер для уменьшения влияния электромагнитных помех удалось добиться того, что экспериментальные кривые, полученные макетом зонда с тороидальными антеннами и макетом дипольно-осевого зонда против моделей пластов, хотя и не стали полностью идентичными, но приобрели схожую форму.

3. На основе результатов измерений, полученных осевым зондом с тороидальными антеннами и дипольно-осевым зондом в различных моделях пластов (рис. 2.26-2.31), был сделан вывод о том, что при расположении зондов в скважине параметры окружающей скважину среды будут оказывать одинаковое влияние на результаты измерений.

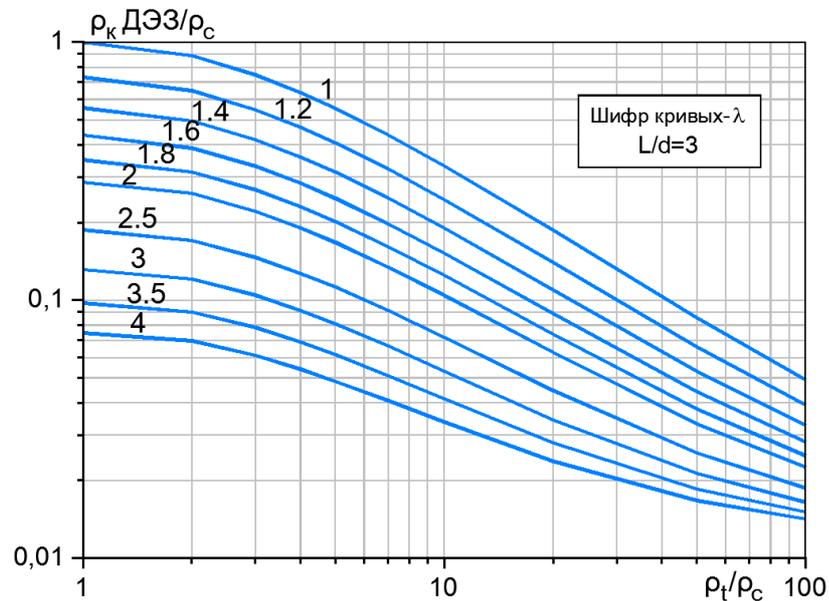
4. При лабораторном моделировании дипольно-экваториальных зондов против анизотропных и практически изотропных пластов были получены низкие значения кажущегося удельного электрического сопротивления. На основе математического моделирования было установлено, что такая нехарактерная для других зондов каротажа КС форма кривых  $\rho_k^{ДЭЗ}$

против пластов обусловлена особенностями распределения индуцированных зарядов при поперечной к оси скважины ориентации токового диполя  $AB$ .

## Глава 5. Интерпретация результатов измерений с дипольно-экваториальными зондами.

### 5.1. Интерпретация результатов измерений, полученных при лабораторном моделировании.

Для разработки методики определения значения  $\rho_n$  и  $\lambda$  по данным, полученным дипольно-экваториальным зондом, Каринским А.Д. было проведено математическое моделирование, результатами которого стали номограммы, построенные для различных параметров модели среды и зонда. В качестве примера одна из таких номограмм приведена на рис. 5.1

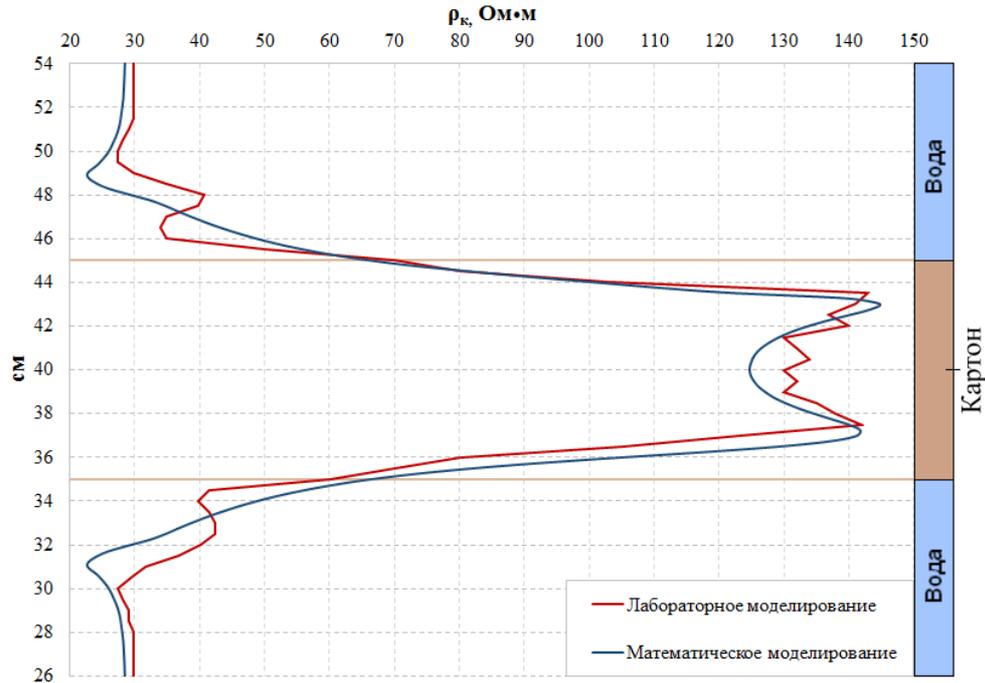


**Рис. 5.1.** Пример номограммы для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значениям  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c$  и  $\rho_t/\rho_c$ .

Для определения  $\lambda$  по номограмме необходимо знать значение  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}$  (против пласта большой мощности по сравнению с длиной зонда  $L$ ),  $\rho_c$  (резистивиметрия),  $d$  (кавернометрия) и величину продольного удельного сопротивления  $\rho_t$  (которую можно определить по результатам измерений зондами каротажа КС, либо – по данным ВИКИЗ, ИК).

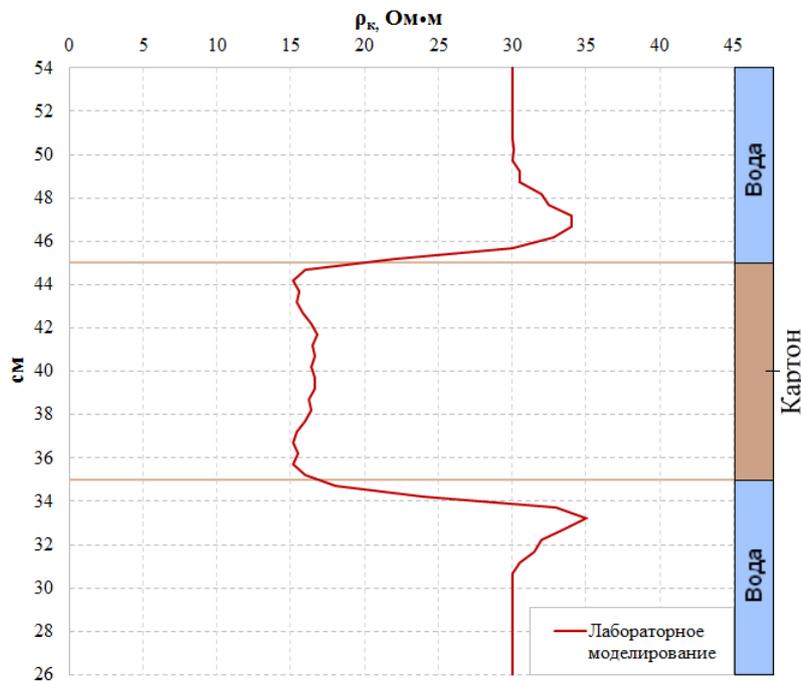
Для экспериментального подтверждения методики определения  $\rho_n$  и  $\lambda$  были проведены измерения дипольно-экваториальным зондом ( $L = 4$  см,  $AB = MN = 0,7$  см) и дипольно-осевым зондом А1В4М1N в модели пласта,

состоящей из слоев картона ( $H = 10$  см). Полученные результаты измерений приведены ниже - на рис. 5.2 и рис. 5.3.



**Рис. 5.2. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В4М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м, (при математическом моделировании  $\rho_{вм}=30$  Ом•м,  $\rho_c=30$  Ом•м,  $\rho_n=150$  Ом•м) ( $\rho_r \approx 148$  Ом•м и  $\rho_n \approx 190$  Ом•м получены в результате измерений на образце картона,  $\lambda \approx 1,13$ )



**Рис. 5.3. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $L=4$  см,  $AB=0,7$  см,  $MN=0,7$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  
 $d=2$  см,  $D=19$  см,  $\rho_{вм} \approx 30$  Ом•м,  $\rho_c \approx 30$  Ом•м,  
 ( $\rho_r \approx 148$  Ом•м и  $\rho_n \approx 190$  Ом•м получены в результате измерений на образце картона,  $\lambda \approx 1,13$ )

На основе сравнения экспериментальных и полученных (при разных значениях  $\rho_t$ ) расчётных данных были получены следующие значения: у модели пройденного скважиной пласта  $\rho_c \approx 30$  Ом·м,  $\rho_t \approx 150$  Ом·м и отношение  $\rho_t/\rho_c \approx 5$ . Полученной величиной этого отношения воспользуемся ниже, при иллюстрации того, как можно определить коэффициент анизотропии  $\lambda$ , если воспользоваться данными измерений с ДЭЗ.

Полученные с ДЭЗ результаты лабораторного моделирования показали, что против модели пласта среднее значение  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}} \approx 16,5$  Ом·м. Тогда (при  $\rho_c \approx 30$  Ом·м) имеем:  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c \approx 0,55$ . Напомним, что в применённой при экспериментах лабораторной установке длина ДЭЗ  $L = 4$  см, диаметр модели скважины  $d = 2$  см и отношение  $L/d = 2$ .

Теперь, зная  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c$  и  $\rho_t/\rho_c$ , воспользуемся номограммой (рис. 5.4), полученной А. Д. Каринским на основе расчётов для соответствующей модели среды и параметров макета зонда.

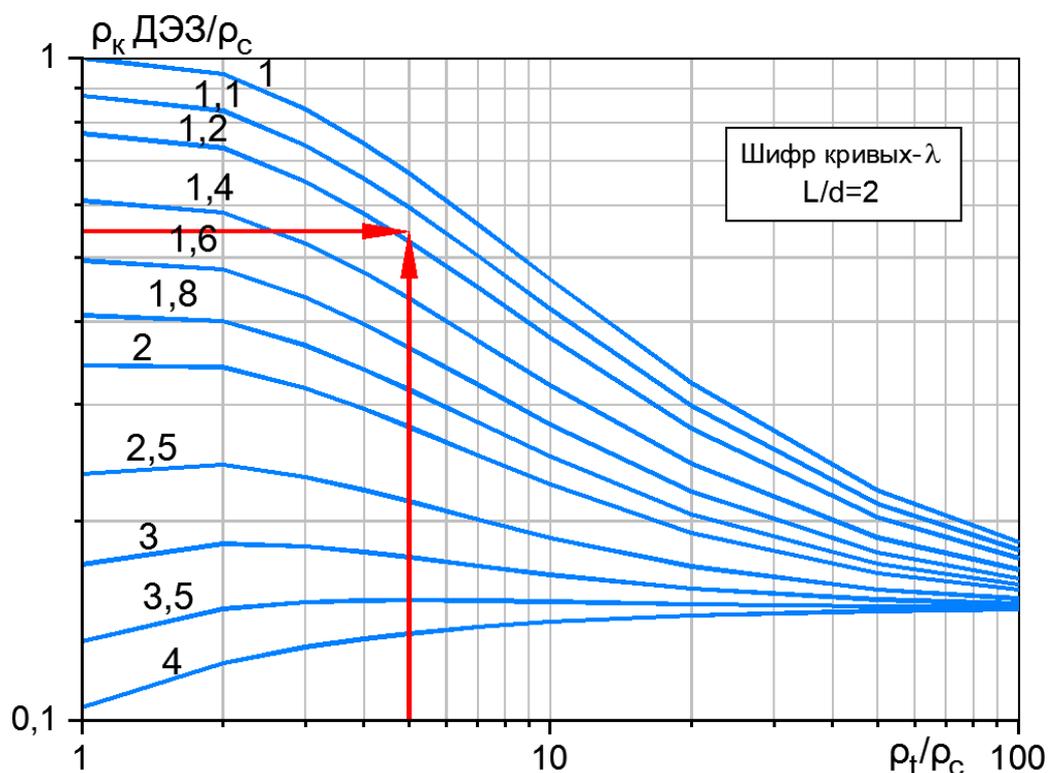
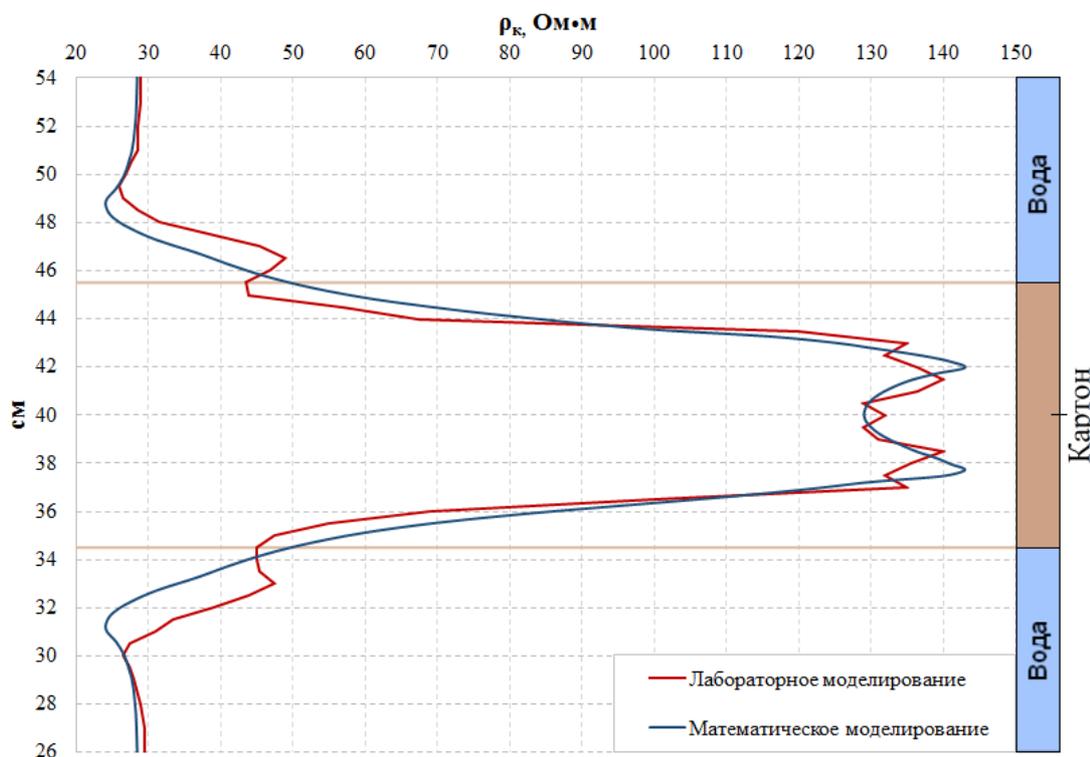


Рис. 5.4. Номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по данным полученных дипольно-экваториальным зондом ( $L/d=2$  и отношению  $\rho_t/\rho_c$ ).

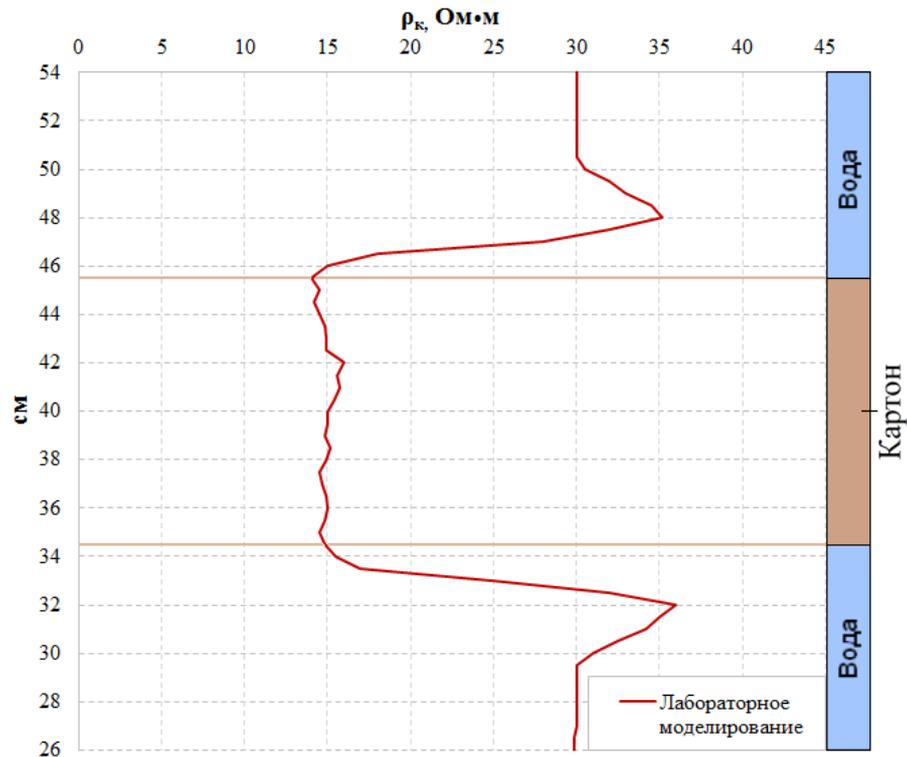
При подстановке значений  $\rho_t/\rho_c \approx 5$  и  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c \approx 0,55$  (на рис. 5.3 отмечено красными линиями) получаем:  $\lambda \approx 1,17$ ,  $\lambda^2 \approx 1,32$ . Зная  $\lambda$  и  $\rho_t$ , вычисляем значение поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n = \lambda^2 \cdot \rho_t = 1,32 \cdot 150 \text{ Ом}\cdot\text{м} \approx 198 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . При определении продольного и поперечного удельного электрического сопротивления на образце картона (применённого при экспериментах) были получены следующие значения:  $\rho_t = 148 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $\rho_n = 190 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , откуда  $\lambda \approx 1,13$ , что лишь незначительно отличается от полученных по номограмме значений  $\rho_n$  и  $\lambda$ .

Рассмотрим ещё один пример определения  $\rho_n$  и  $\lambda$ . В этом случае результаты измерений были получены дипольно-экваториальным зондом ( $OO' = 5 \text{ см}$ ,  $AB = MN = 1 \text{ см}$ ) и дипольно-осевым зондом А1В3М1N в модели пласта, состоящей из слоев картона ( $H = 11 \text{ см}$ ). Результаты измерений приведены на рис. 5.5 и рис. 5.6.



**Рис. 5.5.** Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А1В3М1N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии и с мощностью 11 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:  $d=2 \text{ см}$ ,  $D=19 \text{ см}$ ,  $\rho_{\text{вм}} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , (при математическом моделировании  $\rho_{\text{вм}}=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_c=30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_n=150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) ( $\rho_t \approx 154 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $\rho_n \approx 192 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  получены в результате измерений на образце картона,  $\lambda \approx 1,12$ )



**Рис. 5.6. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ( $L=5$  см,  $AB=1$  см,  $MN=1$  см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 11 см.**

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

$$d=2 \text{ см}, D=19 \text{ см}, \rho_{вм} \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

( $\rho_t \approx 154 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $\rho_n \approx 192 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  получены в результате измерений на образце картона,  $\lambda \approx 1,12$ )

На основе сравнения полученных экспериментальных и расчётных данных (рис. 5.5) были определены следующие значения параметров модели среды:  $\rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_t \approx 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , соответственно отношение  $\rho_t/\rho_c \approx 5$ . Результаты измерений дипольно-экваториальным зондом ( $OO' = 5$  см,  $AB = MN = 1$  см) показали, что против модели пласта среднее значение  $\rho_k^{ДЭЗ} \approx 15,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Тогда (при  $\rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) получим:  $\rho_k^{ДЭЗ}/\rho_c \approx 0,5$ . При лабораторных экспериментах длина дипольно-экваториального зонда составляла  $L = 5$  см, диаметр модели скважины  $d = 2$  см и отношение  $L/d = 2,5$ .

Зная все необходимые параметры, воспользуемся номограммой, построенной для случая, когда отношение  $L/d = 2,5$  (рис. 5.7)

При подстановке значений  $\rho_t/\rho_c \approx 5$  и  $\rho_k^{ДЭЗ}/\rho_c \approx 0,5$  (на рис. 5.7 отмечено красными линиями) получаем:  $\lambda \approx 1,1$ ;  $\lambda^2 \approx 1,21$ . Зная  $\lambda$ , вычисляем значение поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n = \lambda^2 \cdot \rho_t = 1,21 \cdot 150 \text{ Ом}\cdot\text{м} \approx 182 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

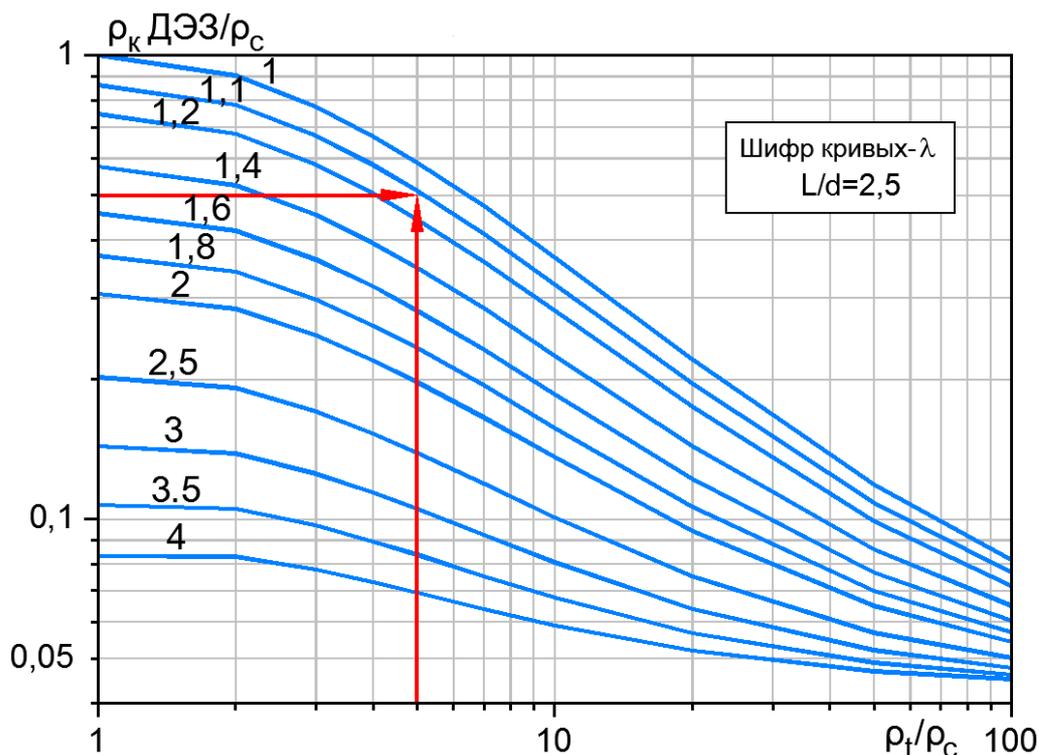


Рис. 5.7. Номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по данным полученных дипольно-экваториальным зондом ( $OO'=5$  см,  $AB=1$  см,  $MN=1$  см).

При определении продольного и поперечного удельных электрических сопротивлений на образце картона (применённого при экспериментах) были получены следующие значения:  $\rho_t \approx 154$  Ом·м и  $\rho_n \approx 192$  Ом·м, откуда  $\lambda \approx 1,12$ . Полученные при измерениях на образце картона значения, как и в предыдущем примере, незначительно отличаются от результатов лабораторного моделирования ( $\rho_t \approx 150$  Ом·м,  $\rho_n \approx 182$  Ом·м,  $\lambda \approx 1,11$ ). Некоторые различия могут быть связаны с тем, что во время измерения  $\rho_t$  и  $\rho_n$  образца картона не представлялось возможным полностью учесть все условия и воздействующие факторы (водонасыщенность образца, оказываемое давление и т. д.) которые присутствовали при лабораторных экспериментах с моделью пройденного скважиной пласта.

Кроме приведённых выше примеров были проинтерпретированы результаты измерений, полученные макетом ДЭЗ ( $L = OO' = 5$  см,  $AB = 1,2$  см,  $MN = 1,2$  см), которые приведены на рис. 4.37-4.39. В результате были получены следующие значения  $\rho_n$  и  $\lambda$ : для модели пласта мощностью 10 см (рис. 4.37)  $\rho_n \approx 192$  Ом·м,  $\lambda \approx 1,13$ ; для модели пласта мощностью 12 см

(рис. 4.38)  $\rho_n \approx 185 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\lambda \approx 1,11$ ; для модели пласта мощностью 14 см (рис. 4.39)  $\rho_n \approx 182 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\lambda \approx 1,1$ . Полученные при интерпретации значения близки к результатам измерений  $\rho_n$  и  $\lambda$  на образце картона.

На основании лабораторного и математического моделирования можно сделать вывод о том, что в вертикальных скважинах при горизонтальном залегании прослоев в анизотропных пластах результаты ДЭЗ (при соответствующем выборе длины зонда) в комплексе с данными других методов (КС, ИК, ВИКИЗ) позволяют определить коэффициент анизотропии  $\lambda$  пройденных скважиной горных пород.

## 5.2. Возможность определения электрических параметров горных пород по результатам измерений, полученных дипольно-экваториальным зондом в скважине.

Моим научным руководителем А. Д. Каринским на основе математического моделирования были получены двухслойные теоретические кривые зондирования для дипольно-экваториальных зондов разной длины при  $AB = MN = d$ . На рис. 5.8,а показаны модели среды и дипольно-экваториального зонда, для которых были получены результаты численных расчётов.

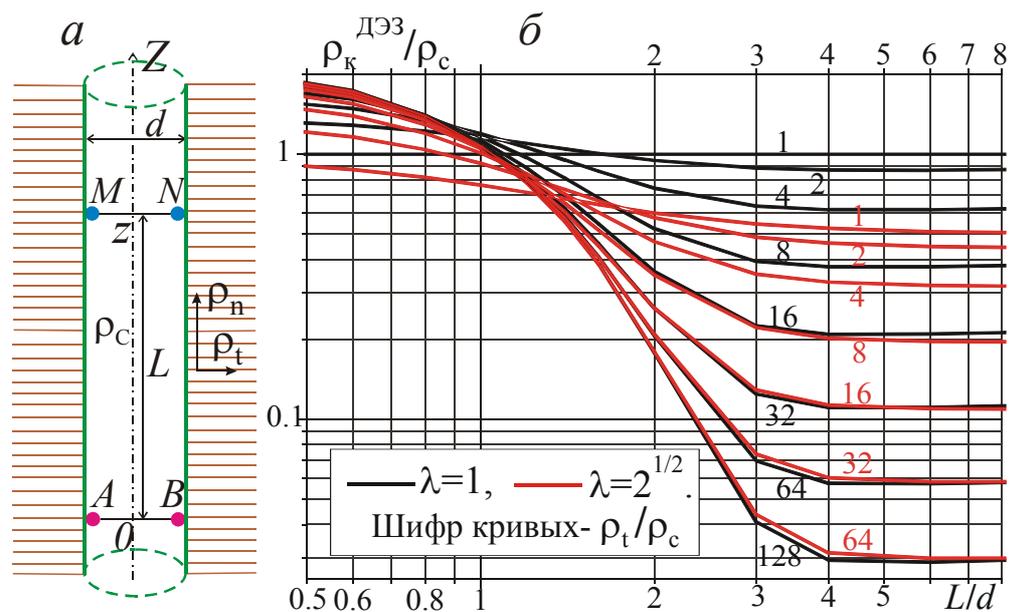


Рис. 5.8. Модель среды и дипольно-экваториального зонда (а); теоретические кривые зондирования ДЭЗ (б).

На рис. 5.8, б видно то, как зависит нормированное на величину удельного электрического сопротивления  $\rho_c$  модели скважины значение  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}$  от отношения длины  $L$  ДЭЗ к диаметру  $d$  модели скважины. Шифром кривых является отношение продольного удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  к  $\rho_c$ . Красным цветом показаны зависимости  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c$  от  $L/d$  для случая, когда коэффициент анизотропии  $\lambda = 2^{1/2} = \sqrt{2}$ . При этом  $\lambda^2 = 2$  и  $\rho_n = 2\rho_t$ . Показанные на этом рисунке чёрным цветом кривые получены для модели изотропного пласта ( $\lambda = 1$ ,  $\rho_n = \rho_t$ ).

На основе результатов математических расчётов, приведённых на рис. 5.8, б, можно отметить одну важную особенность дипольно-экваториальных зондов. Она заключается в том, что кривые зондирования для ДЭЗ выходят на правую асимптоту при небольших длинах зондов  $L > (4 - 5)d$ . Это означает, что при выполнении неравенства  $L > (4 - 5)d$  нормированные на  $\rho_c$  значения  $\rho_k$  ДЭЗ не зависят от  $L$  и  $d$ . Другими словами по одному измеренному значению  $\rho_k$  ДЭЗ против пласта (а не по кривой зондирования) и при известном  $\rho_c$  можно определить необходимое для дальнейшей интерпретации значение  $\rho_k$  ДЭЗ. Такая особенность не присуща кривым зондирования для градиент-зондов или потенциал-зондов (а также ДОЗ) каротажа КС.

Сказанное выше справедливо для двухслойной модели среды (рис. 5.8, а). При наличии зоны проникновения в пройденных скважиной проницаемых пластах, по-видимому, потребуется применение нескольких зондов ДЭЗ разной длины.

Отметим, что при  $L > (4 - 5)d$ , параметры  $\rho_t$  и  $\lambda$  (а, следовательно, и  $\rho_n = \lambda^2 \cdot \rho_t$ ) оказывают на  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}$  значительно большее влияние, чем при небольших длинах зондов (применявшихся при лабораторном моделировании). В дальнейшем неравенство  $L > (4 - 5)d$  следует учесть при разработке опытно-конструкторского образца дипольно-экваториального зонда. Таким образом, целесообразно, чтобы, например, при диаметре скважины  $d = 0,2$  м для определения электрических параметров горных пород по результатам ДЭЗ (в

отсутствие зоны проникновения) длина зонда  $L$  была не менее 0,8-1 м. В качестве иллюстрации методики интерпретация результатов измерений с дипольно-экваториальными зондами таких размеров рассмотрим следующий пример. Допустим, по каротажным диаграммам методов КС, ВИКИЗ, ИК и данным кавернометрии против анизотропного пласта большой мощности получены следующие значения параметров пласта и скважины:  $\rho_c \approx 2$  Ом·м,  $\rho_t \approx 4$  Ом·м,  $d \approx 0,2$  м. По результатам измерений с ДЭЗ длиной  $L = 1$  м определено значение  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}} \approx 0,8$  Ом·м. Тогда отношения:  $\rho_t/\rho_c \approx 2$ ,  $L/d \approx 5$ ,  $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c \approx 0,4$ . По номограмме, приведенной на рис. 5.9, можем определить, что  $\lambda \approx 1,5$ . Следовательно,  $\rho_n = \lambda^2 \cdot \rho_t \approx 2,25 \cdot 4$  Ом·м  $\approx 9$  Ом·м.

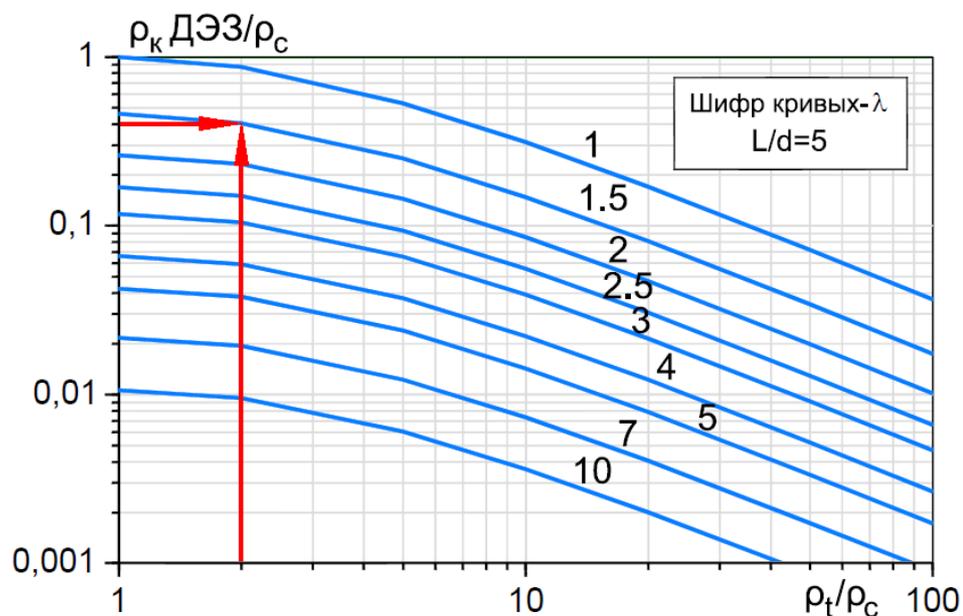


Рис. 5.9. Номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$ .

На основании сказанного выше можно сделать вывод о перспективности создания опытно-конструкторского образца дипольно-экваториального зонда и испытаниях его в скважинах.

### Выводы.

1. Экспериментально была подтверждена методика определения поперечного удельного электрического сопротивления и коэффициента

анизотропии по результатам, полученным дипольно-осевым и дипольно-экваториальным зондами.

2. Рассмотрена возможность определения поперечного удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии по результатам измерений дипольно-экваториальным зондом, длина которого в 5 раз превышает  $d$ , что может соответствовать условиям измерения в скважине.

3. Из приведённых в главе результатов можно сделать вывод о перспективности применения дипольно-экваториальных зондов для определения электрических параметров анизотропных пластов при геофизических исследованиях скважин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы можно охарактеризовать следующим образом.

1. Для проведения исследований были сконструированы лабораторные установки, которые включали в себя модели среды и макеты нескольких зондов электрического и электромагнитного каротажа. Эти установки позволили получить неизвестные ранее экспериментальные данные.

2. В результате проведения лабораторного моделирования различных типов зондов были выявлены некоторые факторы, снижающие точность измерений. Среди них деформация макетов зондов в моделях пластов большой мощности, образование слоев окисла на питающих электродах дипольных зондов, значительное влияние электромагнитных помех, нарушение структуры слоев картона при длительном пребывании в воде, влияние непроводящего корпуса лабораторной модели среды. Для уменьшения влияния этих факторов были приняты соответствующие меры, позволившие снизить искажающие влияние на результаты измерений.

3. В результате проведения лабораторного моделирования было установлено, что параметры лабораторной модели среды оказывают идентичное влияние на результаты измерений, полученных макетом осевого зонда с тороидальными антеннами и макетом дипольно-осевого зонда.

4. При лабораторных экспериментах было установлено, что параметры модели среды влияют на результаты измерений с дипольно-экваториальным зондом существенно иначе, чем на показания других зондов каротажа КС.

5. Экспериментально подтверждена методика определения поперечного удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии по результатам измерений, полученных дипольно-экваториальным зондом.

Полученные при проведении исследования результаты способствуют развитию методики каротажа КС и могут послужить основой для дальнейших исследований, а также разработки и создания новых зондов каротажа КС.

В качестве дальнейшего направления исследований по этой тематике можно предложить создание габаритного макета зонда или опытно-конструкторского образца и проведение измерений в скважинах.

### Библиография

1. Альпин Л.М. Влияние поперечного удельного сопротивления пластов на результаты каротажа сопротивлений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1970, № 7, с. 100-106.
2. Альпин Л.М. Дипольные электрические зондирования. Разведка недр, 1941, № 1.
3. Альпин Л.М. Каротаж истинных (поперечных) сопротивлений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1979, № 3, с. 99-110.
4. Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважине // Изв. вузов. Геология и разведка. 1978, № 4, с. 81-95.
5. Альпин Л.М. Теория дипольных зондирований. Гостоптехиздат, 1950.
6. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Учебник для ВУЗов, 1985, Недр. 407 с.
7. Андерсон Б., Барбер Т., Леверидж Р., и др. Трехмерный индукционный каротаж: старые измерения под новым углом. Нефтегазовое обозрение, том 19, номер 2, Schlumberger, 2008.
8. Антонов Ю.Н. Изопараметрическое каротажное зондирование (обоснование ВИКИЗ). // Геология и геофизика. 1980, № 6, с. 81-91.
9. Вержбицкий В.В. Точечный источник постоянного тока в слоистой анизотропной среде. «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1992, № 2, с. 108-109.
10. Вержбицкий В.В. Электромагнитные поля в слоистой анизотропной среде. «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1988, № 4, с. 99-102.
11. Горбачев Ю.И. Геофизические исследования скважин, Москва, Недр, 1990.

12. Давыдов К.А., Журавлев А.В., Журавлев Н.В. Ретрансляционный модуль для телеметрической системы с электромагнитным каналом связи. Патент RU 2305183. ООО "БИТАС".
13. Даев Д.С., Каринский А.Д. Решение прямой задачи теории каротажа КС при смещённом с оси модели скважины электроде и анизотропии окружающей модель скважины среды. XI Международная конференция "Новые идеи в науках о Земле". Доклады. М., 2013, том 1, с. 379.
14. Дахнов В.Н. Каротаж скважин. Интерпретация каротажных диаграмм. Гостоптехиздат, 1941.
15. Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. Гостоптехиздат, 1947.
16. Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.
17. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин, Недра, 1981.
18. Дахнов В.Н., Кобранова В.Н., Латышова М.Г. и Раполова В.А. Промысловая геофизика, сб. статей. Гостоптехиздат, 1952.
19. Дашевский Ю.А. Изучение электрической анизотропии горных пород в скважинах, учебное пособие, Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2008.
20. Дашевский Ю.А., Полозов С.В., Эпов М.И., Мартынов А.А., Суродина И.В. Разработка зондов постоянного тока с неосесимметричным возбуждением для исследования изотропных и анизотропных разрезов// Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах, Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГГМ, 1999, с. 130-145.
21. Дашевский Ю.А., Суродина И.В., Эпов М.И. Квазитрёхмерное математическое моделирование диаграмм неосесимметричных зондов постоянного тока в анизотропных разрезах, Сиб. журн. индустр. матем., 2002, том 5, номер 3.
22. Дашевский Ю.А., Табаровский Л.А. Определение коэффициента анизотропии установками бокового каротажного зондирования // Геология и геофизика. 1987, № 9. С. 131-132.

23. Дмитриюков Ю.Ю. Устройство для приема скважинной информации. Патент RU 2290508 Общество с ограниченной ответственностью Нефтяная научно-производственная компания "ЭХО".

24. Долль Г.Г. Теория индукционного метода исследования разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти. Перевод с англ. Сб. Вопросы промысловой геофизики. Гостоптехиздат, 1957.

25. Дьяконов Д.И., Леонтьев Е.И., Кузнецов Г.С. Общий курс геофизических исследований скважин. Недра. 1984 г.

26. Зайченко В.Ю. Страницы истории отечественного приборостроения в области геофизических исследований скважин (1917-1991 гг.). Изд. АИС. Тверь 2006.

27. Итенберг С.С., Дахкильгов Т.Д. Геофизические исследования в скважинах, Москва, Недра, 1982.

28. Каринский А.Д. Влияние анизотропии пластов на компоненты поля на оси переменного магнитного диполя. Тезисы доклада. // VI Международная конференция "Новые идеи в науках о Земле". М., 2003, том 2, с. 356.

29. Каринский А.Д. Влияние поперечного удельного электрического сопротивления пластов на электромагнитное поле кабеля. Тезисы докладов конференции «Современные геофизические и геоинформационные системы», 2008, с. 19-20.

30. Каринский А.Д. Зонды с тороидальными антеннами в условиях каротажа в процессе бурения. Тезисы докладов конференции «Современные геофизические и геоинформационные системы», 2008, с. 68-69.

31. Каринский А.Д. Поле тороидальной антенны и переменного электрического диполя в анизотропной среде. Тезисы доклада. // VI Международная конференция "Новые идеи в науках о Земле". М., 2003, том 2, с. 355.

32. Каринский А.Д. Решения прямых задач о поле тороидальной антенны в анизотропной среде. «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 2003, № 1, с. 9-20.

33. Каринский А.Д. Физические предпосылки измерения различных компонент поля в электромагнитном каротаже при изучении анизотропии пластов. Журнал ЕАГО, «Геофизика», 2002, № 4, с. 15-23.

34. Каринский А.Д. Численное решение осесимметричных прямых задач теории электромагнитного каротажа для анизотропных моделей среды методами конечных разностей. «Геофизика». Научно-технический журнал, 2006, № 5, с. 28-30, 35-39.

35. Каринский А.Д., Кауркин М.Д. Математическое и лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа КС в изотропных и анизотропных моделях среды. «Геофизика». Научно-технический журнал. 2013, № 4, с. 36- 42.

36. Каринский А.Д., Кауркин М.Д. Результаты математического и лабораторного моделирования для дипольно-экваториального зонда каротажа КС в изотропных и анизотропных моделях среды. XI Международная конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2013, том 1, с. 395-396.

37. Каринский А., Мусатов А. Зонды электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами в анизотропной среде. Специальный номер журнала «Мексиканского общества геофизиков- разведчиков» (AMGE), посвященный пяти лучшим докладам на IX геофизическом симпозиуме AMGE в Бийа-Эрмоса, Табаско, Мексика, в 2000г. Vol. 41, №1, 2001 г., с. 1- 7 (на испанском).

38. Каринский А.Д., Мусатов А.А. Определение вертикального сопротивления пластов зондами с тороидальными антеннами при каротаже в процессе бурения. Тезисы доклада. // VI Международная конференция “Новые идеи в науках о Земле”. М., 2003, том 2, с. 357.

39. Кауркин М.Д. Лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа кажущегося сопротивления. // Тезисы докладов на VI научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых

«Геология в развивающемся мире». Материалы конференции, 2013, том 1, с. 160-162.

40. Кауркин М.Д. Лабораторное моделирование зонда электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами с целью экспериментальной проверки возможности применения таких зондов при геофизических исследованиях скважин. V всероссийская научно-практическая конференция «Геология в развивающемся мире». Материалы конференции, 2012, том 1, с. 190.

41. Кауркин М.Д. Некоторые результаты лабораторного моделирования дипольно-осевых и дипольно-экваториальных зондов каротажа КС для моделей изотропных и анизотропных пластов. VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле» Материалы конференции, 2014, с. 108.

42. Кауркин М.Д. Перспективы применения дипольных зондов каротажа КС для определения коэффициента анизотропии горных пород. // Тезисы докладов на VII научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире». Материалы конференции, 2014, том 1, с. 224-226.

43. Кауркин М.Д. Разработка модели зонда электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами и результаты лабораторных экспериментов. VI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле» Материалы конференции, 2012, с. 195.

44. Кауркин М.Д. Результаты лабораторного и математического моделирования дипольных зондов электрического каротажа. XV Международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2014» Материалы конференции, 2014, с. 59.

45. Кауркин М.Д. Результаты лабораторного моделирования для зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов каротажа КС для моделей

изотропных и анизотропных пластов. XI Международная конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2013, том 1, с. 397- 398.

46. Кауркин М.Д. Результаты лабораторного моделирования осевых зондов с тороидальными антеннами и дипольно-осевых зондов каротажа КС. Электронное научное издание “Георазрез”, выпуск 2013.01 (13), 2013.

47. Кауркин М.Д., Новиков П.В. Лабораторное моделирование зондов электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами. X Международная конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2011, том 2, с. 28.

48. Кауфман А.А., Каганский А.М. Индукционный метод изучения поперечного сопротивления в скважинах. Новосибирск, Наука, 1970.

49. Козак С.З. Поле точечного источника тока в горизонтально-слоистой анизотропной среде //Геология и геофизика 1984, № 9. С. 134-138.

50. Комаров С.Г. Техника промысловой геофизики. М., Гостоптехиздат, 1957.

51. Кулинкович А.Е. К Теории каротажа электрически анизотропных пластов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1958, № 6, с. 83-94.

52. Манштейн А.К., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., Эпов М.И. Устройство для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород. Патент RU 2528276. Открытое акционерное общество "Нефтяная компания "Роснефть" 10.09.2014.

53. Нестеров Л.Я., Бибииков Н.С., Усманов А.Ш. Курс электроразведки. ГОНТИ, 1938.

54. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Издательство ЛКИ, 2008, 656 с.

55. Свихнушин Н., Тухтаев Р., Шмыгля К. Исследование тонкослоистых коллекторов нефти и газа. Новые технологии ГИС. Нефтегазовое обозрение, том 7, номер 2, Schlumberger, 2002.

56. Семенов А.С. Поле дипольной линии над анизотропным полупространством. Уч. зап. ЛГУ. Вопр. геофиз., № 25, 1975.

57. Семенов А.С., Владимиров О.К. Каротаж рудных скважин методом скользящих контактов. М., Госгеолиздат, 1947.
58. Семенов А.С. и др. Поле вертикального электрического диполя в анизотропной среде. *Вопр. развед. геофиз.*, вып. 3, 1964.
59. Сидорчук А.И. Электрокаротаж в анизотропной среде с неоднородной зоной проникновения // *Изв. АН СССР/ Физ. Земли*, 1971, № 6. С. 41-47.
60. Сидорчук А.И., Чаадаев Е.В. Оценка влияния анизотропии на кривые КС в многослойных средах // *Геология и геофизика* 1972, № 11. С. 86-94.
61. Сухорукова К.В. Развитие методики интерпретации данных высокочастотных электромагнитных зондирований в скважинах с горизонтальным завершением: Автореф. дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 1998.
62. Табаровский Л.А., Черяука А.Б. Математическое моделирование электромагнитных полей в анизотропных средах. Деп. В ВИНТИ 19.07.88, № 6261-В88.
63. Табаровский Л.А., Эпов М.И. Электромагнитные поля гармонических источников в слоистых анизотропных средах. *Геология и геофизика* 1977, № 1, с. 101-109.
64. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. РД 153-39.0-072-01. от 2001.07.01.
65. Тихонов А.Н. О распространении электромагнитного поля в слоистой анизотропной среде. 1959. *ДАН СССР*, т.126, №5, с. 967-970.
66. Тюркишер Р.И. Электрокаротаж в анизотропной среде // *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.* 1945, т. IX, № 3. С. 279-287.
67. Федоров А.И., Эпов М.И. Переменное электромагнитное поле в наклонно-анизотропной слоистой среде. *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2003, т. 6, № 4 (16), с. 119-131.

68. Чаадаев Е.В., Гайдаш А.Д., Санто К.Л., Пантюхин В.А. Индукционный каротаж наклонных анизотропных пластов. Геология и геофизика 1980., № 10, с. 106-112.
69. Чаадаев Е.В., Павлова Л.И. К теории кольцевых зондов в анизотропной цилиндрически- слоистой среде. // Изв. вузов. Геология и разведка. 1980, № 10, с. 105-111.
70. Чаадаев Е.В., Павлова Л.И. Экранированный кольцевой зонд в анизотропной среде с цилиндрическими поверхностями раздела. // Изв. вузов. Геология и разведка. 1980, № 12, с. 108-113.
71. Чаадаев Е.В., Румянцев В.Н. и др. О влиянии анизотропии пласта и зоны проникновения на форму кривых БКЗ. // РНТС ВНИИОЭНГ, сер нефтегаз. геофиз., 1977, № 9.
72. Четаев Д.Н. О поле низкочастотного диполя, лежащего на поверхности однородного анизотропного проводящего полупространства. Журн. техн. физ., 1962, т. 32, № 11.
73. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. (ред.). Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. Издательство СО РАН, 2000, 121 с.
74. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю. Выделение пластов в терригенном разрезе по данным ВИКИЗ // Каротажник, 1999, № 57, с. 58-69.
75. Эпов М.И., Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., Антонов Ю.Н., Лаврухов В.Т., Ельцов И.Н., Жмаев С.С., Ульянов В.Н., Дашевский Ю.А., Полозов С.В. Новые разработки в области электрического и электромагнитного каротажа.// Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах, Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999, с.16-18.
76. Эйдман И.Е. А. с. 272448 СССР, МКИ G01V 3/04/G01V 3/18. Способ индукционного каротажа скважин, 1970. – 4 с.

77. Ярмахов И.Г. Способ электромагнитного исследования горных пород за обсадной колонной. Патент RU 2316026. Открытое акционерное общество "Объединенная энергетическая группа "Петросервис".

78. Arps Jan J. Method and apparatus measuring electrical anisotropy in formations surrounding a wellbore. Arps Corp. United States Patent 3305771. February 21, 1967.

79. Bittar Michael S.. Multi-depth focused resistivity imaging tool for logging while drilling applications. Halliburton Energy Services, Inc. United States Patent 6359438. March 19, 2002.

80. Bonner Stephen D., Rosthal Richard A., Bagersh Abdullah A. Apparatus and method for determining the resistivity of earth formations. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 5339037. August 16, 1994.

81. Bonner Stephen D., Rosthal Richard A., Bagersh Abdullah A., Luling Martin G., Jundt Jacques A. Apparatus and method for determining the resistivity of underground formations surrounding a borehole. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 5463320. October 31, 1995.

82. Burkay Donderici. Deep azimuthal system with multi-pole sensors. Halliburton Energy Services, Inc. Patent WO2014105084. July 3, 2014.

83. Clark Brian, Bonner Stephen D., Jundt Jacques, Luling Martin. Logging while drilling apparatus with blade mounted electrode for determining resistivity of surrounding formation. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 5339036. August 16, 1994.

84. Clark Brian, Bonner Stephen D., Jundt Jacques, Luling Martin. Well logging apparatus having toroidal induction antenna for measuring, while drilling, resistivity of earth formations. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 5235285. August 10, 1993.

85. Dean M. Homan, Dzevat Omeragic. Detection of borehole currents due to a decentered transverse magnetic dipole transmitter. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 6927578. August 9, 2005.

86. Doll H.G. The Laterlog a New Resistivity Logging Method with Electrodes Using an Automatic Focusing System. *Petr. Develop. a Technol.*, vol. 192, 1951.
87. Doll H.G. The Microlog – f New Electrical Logging Method for Detailed Determination of Permeable Beds. *J. Petr. Techn.*, VI, vol. 2, No. 6, 1950.
88. Gianzero Stanley C. Induction logging utilizing resistive and reactive induced signal components to determine conductivity and coefficient of anisotropy. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 4302722. November 24, 1981.
89. Gianzero Stanley C. Method and apparatus measuring electrical anisotropy in formations surrounding a wellbore. Halliburton Energy Services, Inc. United States Patent 6958610. October 25, 2005.
90. Gianzero S., 1999, The paradox of anisotropy revisited, *The Log Analyst* , Vol. 40, No. 6, pp. 485-491.
91. Gianzero S., Chemali R., Lin Y., Su S., Foster M., 1985. A new resistivity tool for measurement-while-drilling. *SPWLA, 26<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*, Paper A.
92. Gianzero Stanley C., Sinclair Paul, Chemali Roland E., Su Shey-Min. Azimuthally oriented coil array for MWD resistivity logging. Halliburton Energy Services, Inc. United States Patent 5045795. September 3, 1991.
93. Karinski A. Physical preconditions of different field components measurements at electromagnetic logging for anisotropy parameters estimation. UGM, Puerto Vallarta, México, 5-10 November. 2001.
94. Karinski A. and Mousatov A. Feasibility of vertical resistivity determination by the LWD sonde with toroidal antennas for oil-base drilling fluid. *SPWLA 43<sup>nd</sup> Annual Logging Symposium*. June 2-5, 2002. Paper Q, 13 pp.
95. Karinski A., Mousatov A. Registros electromagnéticos con antenas toroidales en medios anisótropos. IX Simposium de AMGE y III Conferencia de la Unión Latinoamericana de Geofísica, 17-20 Octubre 2000 Villahermosa, Tabasco, México.

96. Karinski A., and Mousatov A., 2001, Vertical resistivity estimation with toroidal antennas in transversely isotropic media. SPWLA 42<sup>nd</sup> Annual Logging Symposium. June 17-20, 2001. Paper BB, 14 pp.
97. Kuckes Arthur F. Apparatus for locating an elongated conductive body by electromagnetic measurement while drilling. Vector Magnetics. United States Patent 4933640. June 12, 1990.
98. Maurer Hans-Martin, Beard David R., Khokar Rashid W. Estimating a parameter of interest with transverse receiver toroid. Baker Hughes Incorporated. United States Patent 8669765. March 11, 2014.
99. Maurer Hans-Martin, Beard David R. Multiple depths of investigation using two transmitters. Baker Hughes Incorporated. United States Patent 8547103. October 1, 2013.
100. Maurer Hans-Martin, Beard David R., Khokar Rashid W. Toroid galvanic azimuthal lwd tool. Baker Hughes Incorporated. United States Patent 20110221442. September 15, 2011.
101. Moore Robert A. Well logging apparatus for obtaining azimuthally sensitive formation resistivity measurements. Pathfinder Energy Services, Inc. United States Patent 7436184. October 14, 2008.
102. Moran James H. Apparatus and method for determining dip and/or anisotropy of formations surrounding a borehole. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 4302723. November 24, 1981.
103. Osborn William F., Redwine Fletcher H. Formation resistivity measurement while drilling, utilizing physical conditions representative of the signals from a toroidal coil located adjacent the drilling bit. Arps Corp. United States Patent 3408561. October 29, 1968.
104. Schlumberger C. Et M. Communication sur la carottage électrique II Congrès International de forage Paris Saint Etienne 1929.
105. Schlumberger C., Etudes sur la prospection électrique du sous-sol, 80 pp., Gauthier-Villars, Paris, 1920.

106. Sinclair Paul L., Su Shey-Min, Chemali Roland E. Logging while drilling apparatus with multiple depth of resistivity investigation. Halliburton Energy Services, Inc. United States Patent 5428293. June 27, 1995.

107. Sinclair Paul L. Retrievable resistivity logging system for use in measurement while drilling. Cedar Bluff Group Corporation. United States Patent 6064210. May 16, 2000.

108. Wu Peter T. Apparatus and method for determining properties of anisotropic earth formations. Schlumberger Technology Corporation. United States Patent 5886526. March 23, 1999.