

На правах рукописи



Кауркин Михаил Дмитриевич

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

Специальность: 25.00.10 – Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015 г.

Работа выполнена на кафедре геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Каринский Александр Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор, главный научный сотрудник
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
Фоменко Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник ФГУП «ВНИГНИ»
Афанасьев Михаил Лукьянович

Ведущая организация: **Открытое акционерное общество «Центральная геофизическая экспедиция» (ОАО «ЦГЭ»)**

Защита диссертации состоится 22 октября 2015 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ и на сайте ВАК.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н, доцент



Романов Виктор Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Анизотропия присуща многим горным породам. Сущность явления анизотропии заключается в различии значений параметров (электрических, тепловых, магнитных и других) по разным направлениям. В частности, анизотропия может проявляться в удельном электрическом сопротивлении горных пород. Для характеристики параметров анизотропных пород наиболее часто применяют модель среды с осевой анизотропией (одноосно-анизотропная модель среды). Её удельное электрическое сопротивление ρ характеризуют два значения: поперечное удельное электрическое сопротивление ρ_n по оси анизотропии n (ориентированной по нормали к напластованию пород, либо – к простиранию трещин) и продольное удельное электрическое сопротивление ρ_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 электрометрии часто не могут предоставить информацию о значении поперечного удельного электрического сопротивления ρ_n . Это связано с тем, что при (типичном в условиях платформ) субгоризонтальном залегании пластов и прослоев, слагающих терригенные осадочные породы-коллекторы, результаты применяемых электрических методов каротажа в вертикальных скважинах зависят, в основном, от параметра ρ_t (парадокс анизотропии). Парадокс анизотропии заключается в несоответствии характера изменений, кажущихся и истинных удельных сопротивлений в анизотропной среде при применении электроразведочных установок или зондов каротажа КС с расположенными на одной прямой токовыми и измерительными электродами. В тонкослоистой анизотропной среде её истинное продольное удельное электрическое сопротивление ρ_t всегда меньше, чем поперечное сопротивление ρ_n . Кажущееся же удельное сопротивление ρ_k при ориентации линейной электроразведочной установки, либо трёхэлектродного зонда каротажа КС по напластованию прослоев – больше, чем значение ρ_k в случае, если такие установки или зонды ориентированы по оси анизотропии n . При этих же условиях результаты таких электромагнитных методов ГИС, как ИК, ВИКИЗ тоже зависят, в основном, от параметра ρ_t .

В связи с этим при указанных условиях по данным ГИС нельзя получить информацию о поперечном удельном электрическом сопротивлении ρ_n и коэффициенте анизотропии λ пройденных скважиной анизотропных пластов-коллекторов. Однако для определения наиболее значимых для практики характеристик анизотропных пластов-коллекторов, например, типа их насыщения, параметр ρ_n является более информативным, чем ρ_t .

Параметры электрической анизотропии содержат важную геолого-геофизическую информацию о строении и свойствах горных пород. Поэтому разработка методов ГИС, по результатам которых можно определить значения ρ_n или λ 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 дипольных зондов каротажа КС и зондов с тороидальными антеннами при геофизических исследованиях скважин с целью определения параметров ρ_n и λ 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 ρ_k дипольно-экваториального зонда (ДЭЗ) существенно иное влияние, чем на значения ρ_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 ρ_n и λ 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 ρ_k дипольно-экваториального зонда существенно иное влияние, чем на значения ρ_k других зондов каротажа КС. При удельных электрических сопротивлениях пластов, более высоких, чем ρ скважины, значение ρ_k , полученное с дипольно-экваториальным зондом, уменьшается с увеличением ρ 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, XI, XII Международные конференции “Новые идеи в науках о Земле”, 2011 г., 2013 г., 2015 г.; VI, VII Международные научные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодые – наукам о земле”, 2012 г., 2014 г.; V, VI, VII Всероссийские

научно-практические конференции «Геология в развивающемся мире», 2012 г., 2013 г., 2014 г.; XV Международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2014», 2014 г.

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 таблицы, библиографию из 108 наименований.

Работа выполнена на кафедре геофизики Российского государственного геологоразведочного университета.

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 А.С. Кауркиной за проявленное ею терпение и поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, теоретическая и практическая ценность, научная новизна результатов, а также защищаемые положения.

Глава 1. Методы ГИС для определения удельного электрического сопротивления горных пород и параметры электрической анизотропии

В разделе 1.1 «**Краткий обзор истории развития электрических и электромагнитных методов исследования скважин**» приведены наиболее значимые этапы развития электрических и электромагнитных методов исследования скважин.

В разделе 1.2 «**Методы определения удельного электрического сопротивление горных пород при каротаже нефтяных и газовых скважин**» охарактеризованы следующие основные электрические и электромагнитные методы каротажа, входящие в состав общих и детальных геофизических исследований разрезов нефтяных и газовых скважин: метод кажущегося сопротивления (КС); боковое каротажное зондирование (БКЗ); боковой каротаж (БК); микрокаротаж; боковой микрокаротаж (МБК); индукционный каротаж (ИК); в качестве дополнительного метода рассмотрено высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ).

В разделе 1.3 «**Проблема определения параметров электрической анизотропии горных пород при геофизических исследованиях скважин**» дано описание тому, с чем связаны сложности при определении параметров λ и ρ_n электрической анизотропии горных пород при геофизических исследованиях скважин, а также указана значимость определения этих параметров. В качестве примера современных разработок, предназначенных для определения всех параметров анизотропии горных пород по удельному электрическому сопротивлению, рассмотрен зонд трехмерного индукционного зондирования Rt Scanner, созданный фирмой «Шлюмберже».

В разделе 1.4 «**Применение дипольных зондов и зондов с тороидальными антеннами при геофизических исследованиях скважин**» приведены основные разработки и исследования иностранных и отечественных учёных, связанные с применением зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.

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

В разделе 2.1 «**Лабораторные установки, применённые при физическом моделировании**» рассмотрены лабораторные установки, применённые при экспериментах.

Для физического моделирования были созданы несколько лабораторных установок (рис. 1), включающих модели пересечённых скважиной анизотропных, либо изотропных, пластов и макеты нескольких зондов электрического и электромагнитного каротажа, некоторые из которых (судя по результатам проведённых ранее теоретических исследований) могут быть перспективны при

изучении параметров электрической анизотропии пройденных скважиной горных пород.

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

Лабораторная модель среды

Лабораторные модели среды состояли из моделей пласта (на рис. 1 показаны коричневым цветом), а также моделей вмещающих пласт пород и моделей скважины (на рис. 1 показаны голубым цветом). Модели среды имели форму прямых круговых цилиндров, ограниченных слоем оргстекла, либо воздуха (в верхних частях моделей). Цилиндры были заполнены водой. В средней части лабораторной модели среды 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.

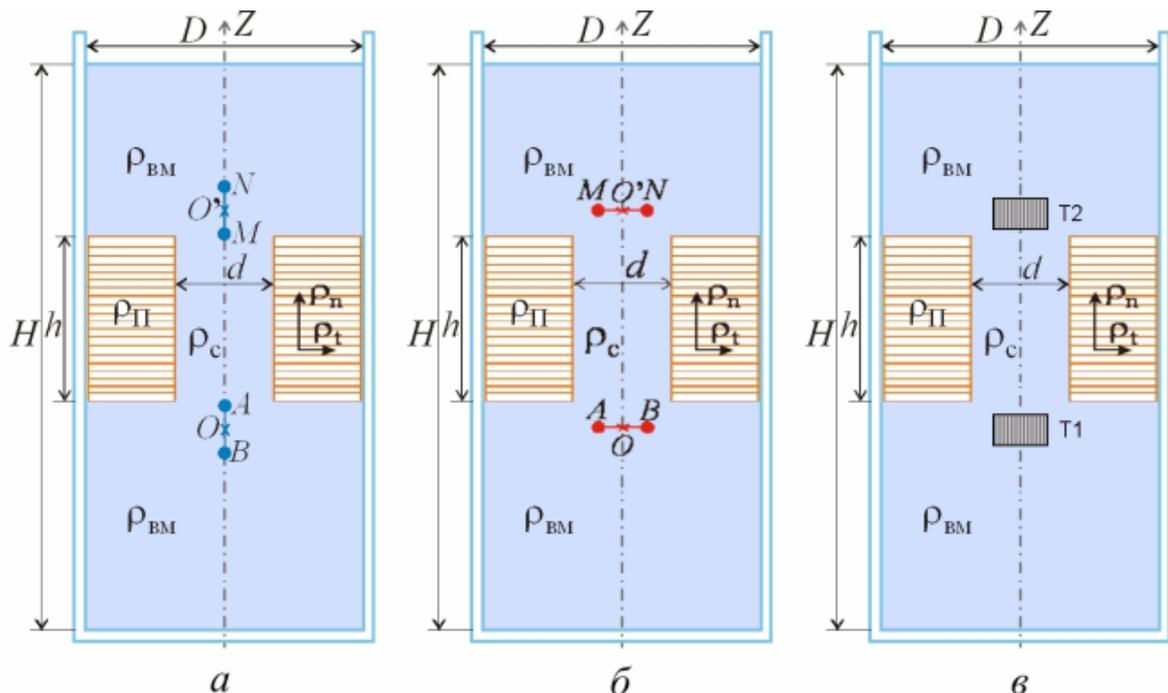


Рис. 1. Схема установок для лабораторного моделирования дипольно-осевого зонда (а), дипольно-экваториального (б) и зонда с тороидальными антеннами (в).

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

Для физических экспериментов были изготовлены модели пройденных скважиной изотропных и анизотропных пластов. При изготовлении моделей пластов были применены такие материалы как картон, оргстекло, алюминий. 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, равное модели скважины диаметром $d=2$ см. Применённые при изготовлении моделей пластов слои различных материалов показаны на рис. 2.

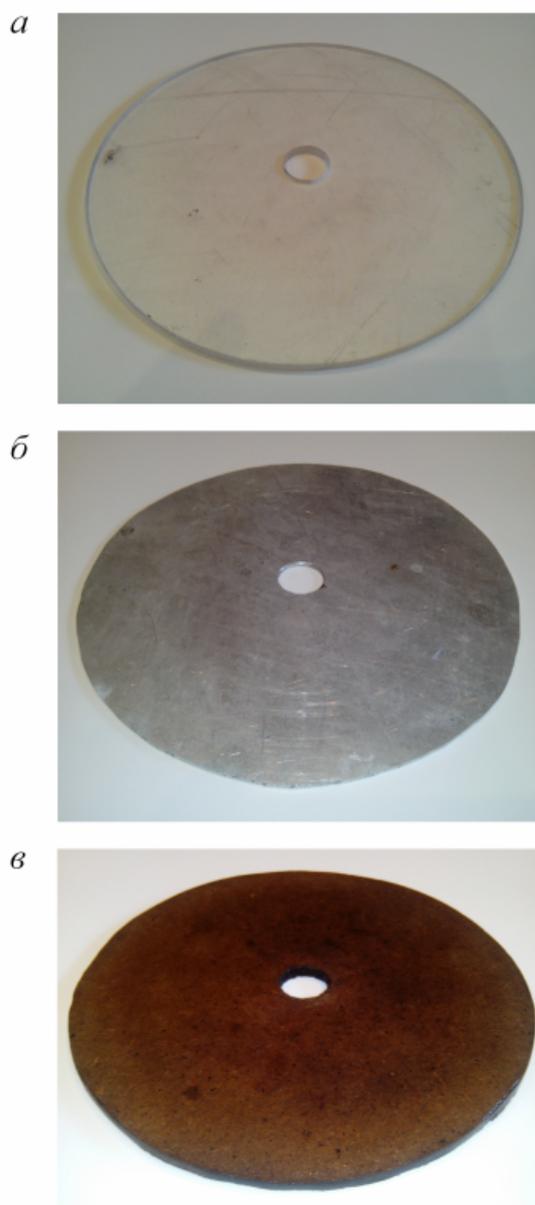


Рис. 2. Примеры применённых при лабораторном моделировании слоёв оргстекла (а), алюминия (б), картона (в).

При лабораторных экспериментах модель пласта из слоёв оргстекла, соответствовала пласту высокого удельного электрического сопротивления. Для моделирования пласта с низким удельным электрическим сопротивлением был применён алюминий. Модель пласта, которая состояла из (пропитанных водой) слоёв картона, соответствовала случаю слабо-анизотропного пласта.

Благодаря применению при конструировании лабораторных моделей пластов материалов с разным удельным электрическим сопротивлением и различного числа слоёв, при физическом моделировании были получены экспериментальные данные для моделей пластов с существенно различающимися электрическими параметрами.

Одна из моделей среды, применённая при лабораторном моделировании, показана на рис. 3, а. В этом случае модель пласта состояла из чередующихся слоёв картона.



Рис. 3. Примеры моделей среды, применённых при лабораторном моделировании.

а – модель среды со слабо-анизотропной моделью пласта,

б – модель однородной изотропной среды.

На рис. 3, *б* представлена лабораторная модель однородной изотропной среды. Такая модель среды была применена для проведения калибровочных измерений и оценки достоверности результатов, полученных различными макетами 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 модели 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.

Схематично зонды, применённые при лабораторном моделировании, показаны на рис. 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, применённых при лабораторных экспериментах, показаны на рис. 4.

Макет дипольного зонда состоял из пластмассового каркаса, в который были установлены и плотно зафиксированы свинцовые электроды; они в свою очередь при помощи проводов были соединены с измерительной аппаратурой. Применённые в макетах дипольных зондов электроды имели

форму шара диаметром 2 мм. Для удобства позиционирования на каждой макете зонда была расположена измерительная лента.

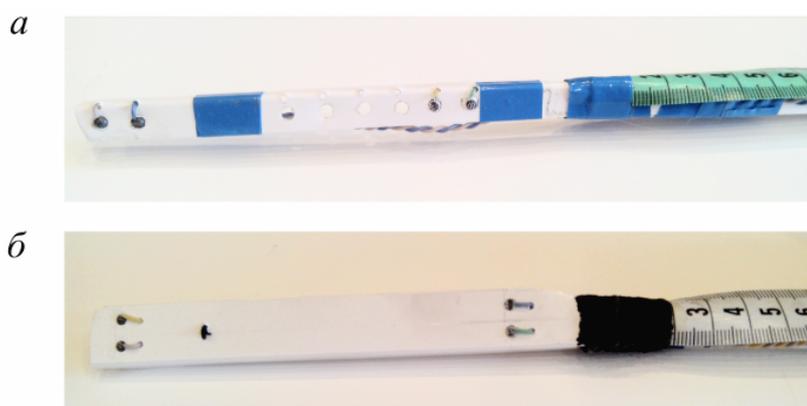


Рис. 4. Макет дипольно-осевого зонда (а) и дипольно-экваториального зонда (б).

Макет зонда с тороидальными антеннами состоял из соосных генераторной (Т1) и измерительной (Т2) тороидальных антенн (рис. 2, в). Основой тороидальной антенны являлся ферритовый сердечник в форме кольца, на который был равномерно намотан провод. Генераторная и измерительная антенны по своим характеристикам (число витков обмотки, материал сердечника и т.д.) были идентичными. На рис. 5 показана одна из тороидальных антенн, применённая при экспериментах.

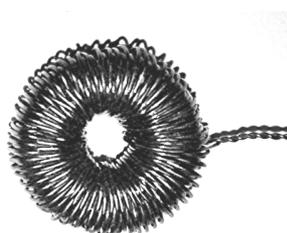


Рис. 5. Пример тороидальной антенны, применённой в макетах зондов.

Для исключения утечек в обмотках антенн, вызванных повреждением изоляции провода, все антенны были покрыты тонким 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 макетах дипольных зондов.

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 макеты зондов с тороидальными антеннами и дипольных зондов.

В разделе 2.2 «Аппаратура, применённая при лабораторном моделировании» приведены технические характеристики аппаратуры, которая была применена для физического моделирования различных типов зондов.

В разделе 2.3 «**Методика проведения лабораторного моделирования**» описан процесс подготовки модели среды и методика проведения лабораторных экспериментов для различных типов зондов.

В разделе 2.4 «**Особенности проведения лабораторного моделирования**» рассмотрены некоторые факторы, выявленные во время подготовки и проведения экспериментов, которые оказывали существенное влияние на результаты измерений.

Для получения результатов лабораторного моделирования, близких к результатам математического моделирования (для ДОЗ), необходимо было решить следующие проблемы:

- деформация макетов зондов, вызванная неровностями скважины в модели пласта;
- образование окислов на питающих электродах дипольных зондов,
- влияние электромагнитных помех на результаты измерений, особенно с макетами зондов с тороидальными антеннами;
- влияние непроводящего корпуса лабораторной модели среды;
- изменение свойств картона в результате длительного пребывания в водном растворе солей.

Для снижения влияния перечисленных факторов был принят ряд мер. В результате чего были получены данные лабораторного моделирования, согласующиеся с математическими расчётами.

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.

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 некоторых факторов, оказывавших влияние на результаты лабораторного моделирования, и позволило принять меры по их устранению.

В разделе 3.1 «**Методика численных расчётов при осевой симметрии лабораторной установки**» кратко охарактеризован основанный на методе конечных разностей подход, применённый при численном решении двумерных прямых задач электродинамики, для условий, соответствующих осесимметричным лабораторным установкам.

В разделе 3.2 «**Решение прямой задачи теории каротажа КС при смещённом с оси симметрии модели среды точечном токовом электроде и анизотропии окружающей скважину среды**» представлено решение прямой задачи для модели среды «скважина - анизотропный пласт неограниченной

мощности” при смещённом с оси симметрии модели среды точечном токовом электроде.

Глава 4. Результаты лабораторного моделирования зондов с торидальными антеннами и дипольных зондов.

В разделе 4.1 «Результаты лабораторного моделирования дипольно-осевых зондов» приведено сопоставление результатов математических расчетов и физического моделирования макетов дипольно-осевых зондов (ДОЗ) для моделей пластов различной мощности и удельного электрического сопротивления.

При лабораторных экспериментах были применены следующие модели пластов:

- пласт высокого удельного электрического сопротивления,
- пласт низкого удельного электрического сопротивления,
- пласт с низким значением коэффициента анизотропии,
- пласт, состоящий из чередующихся тонких слоёв с разными удельными электрическими сопротивлениями.

В качестве примеров ниже показаны результаты математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N (здесь и ниже расстояния между центрами электродов указаны в сантиметрах) для моделей пластов мощностью 1 см с разными удельными электрическими сопротивлениями. На рис. 6 и других рисунках (на которых приведены результаты лабораторного моделирования) по горизонтальным осям показаны значения кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k , а по вертикальным осям – координаты точки записи зондов (в сантиметрах).

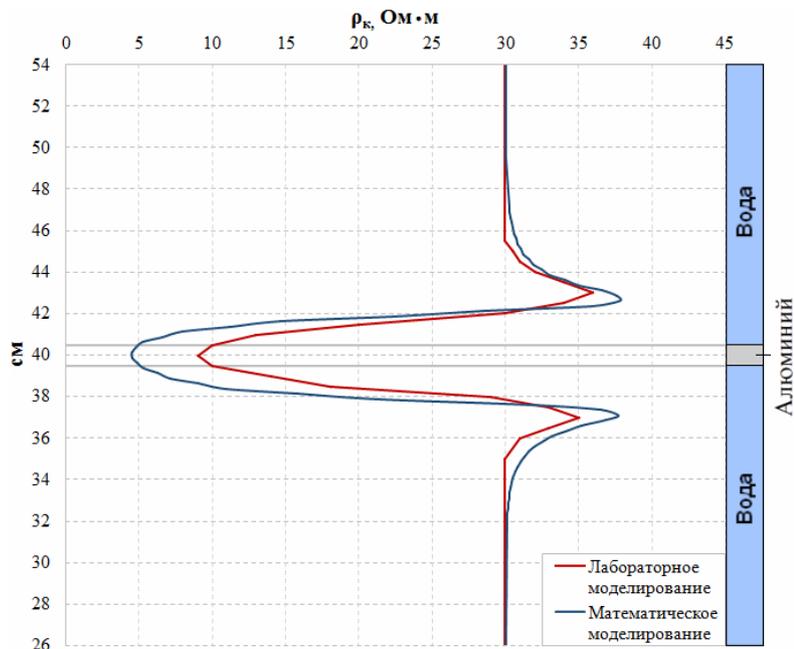


Рис. 6. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 1 см.

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

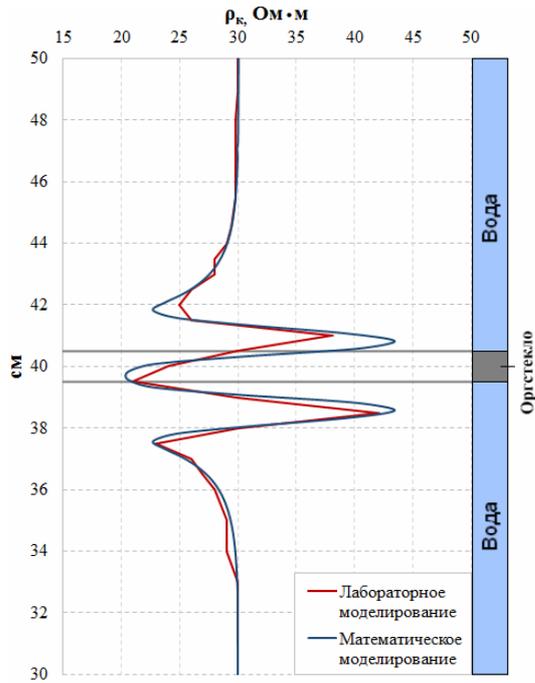


Рис. 7. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта высокого удельного электрического сопротивления мощностью 1 см.

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

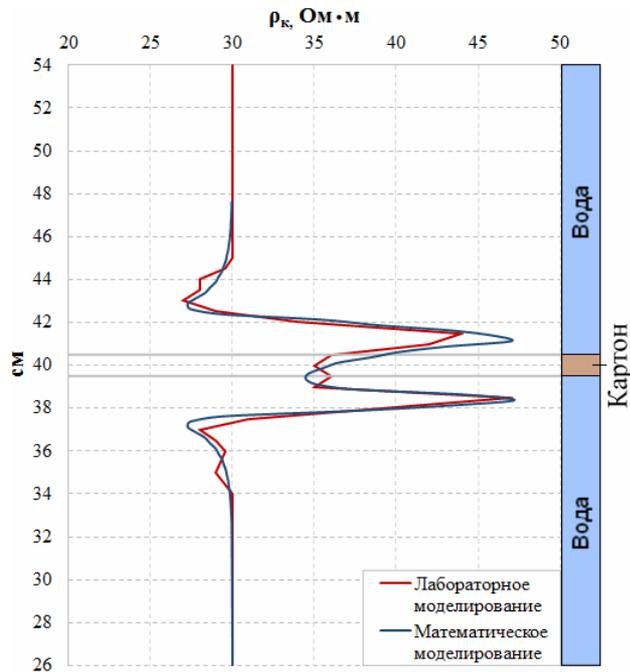


Рис. 8. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 1 см.

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)

Из приведённых результатов видно, что экспериментальные и расчётные значения ρ_k ДОЗ для различных моделей пластов имеют несущественные отличия. На этом основании был сделан вывод о корректной работе измерительной аппаратуры и незначительном влиянии электромагнитных помех на результаты, полученные при физическом моделировании дипольно-осевых зондов.

В разделе 4.2 «**Результаты лабораторного моделирования осевых зондов с тороидальными антеннами**» приведено сопоставление результатов физического моделирования макетов осевых зондов с тороидальными антеннами и дипольно-осевых зондов при разных параметрах моделей пластов.

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 ρ_k применялся экспериментально полученный коэффициент. Лабораторные эксперименты с ТОЗ были проведены для моделей пластов различных по мощности и удельному электрическому сопротивлению.

В качестве примера ниже приведено сопоставление результатов физического моделирования, полученных с осевым зондом с тороидальными антеннами (при длине зонда $L=4$ см) и с дипольно-осевым зондом А0,5В3М0,5N для разных по удельному электрическому сопротивлению моделей пласта.

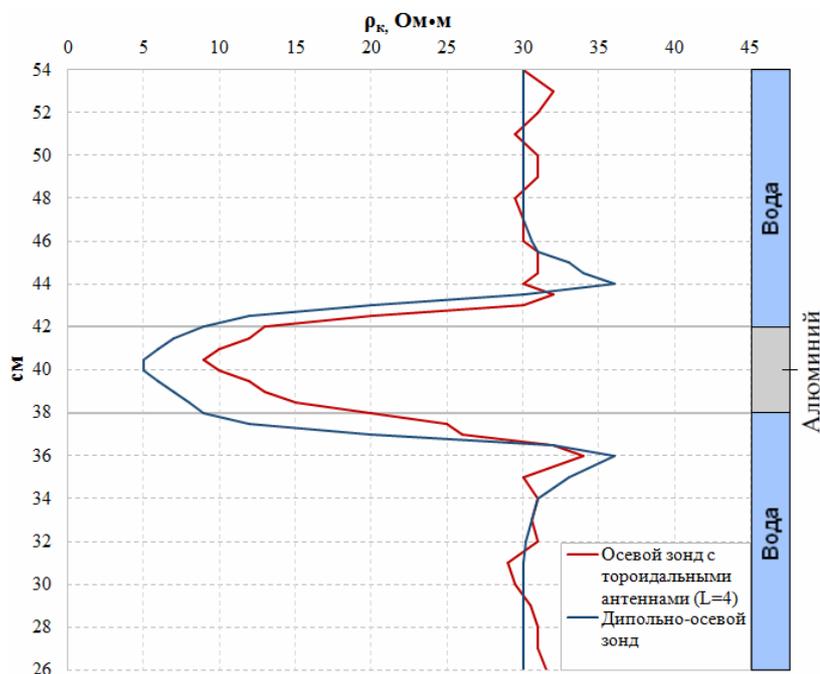


Рис. 9. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ($L=4$) и дипольно-осевого зонда А0,5В3М0,5N для модели пласта низкого удельного электрического сопротивления мощностью 4 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

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

На рис. 9, 10 видно, что кривая, полученная осевым зондом с тороидальными антеннами, осложнена экстремумами, не связанными с

влиянием модели среды. Такие особенности кривой ТОЗ обусловлены влиянием электромагнитных помех. Для уменьшения влияния этих помех были приняты меры, однако полностью исключить это влияние не удалось. Различия в формах кривых против модели пласта, кроме влияния электромагнитных помех, могут быть вызваны неточностями центрирования зонда с тороидальными антеннами и неполным совпадением параметров ТОЗ и дипольно-осевого зонда.

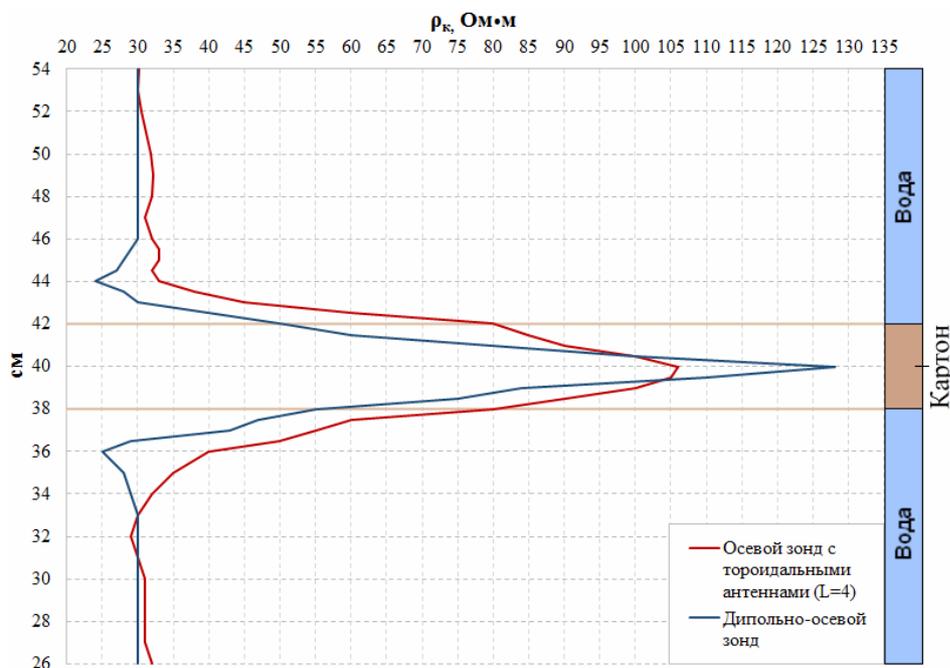


Рис. 10. Сопоставление результатов лабораторного моделирования осевого зонда с тороидальными антеннами ($L=4$) и дипольно-осевого зонда A0,5B3M0,5N для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 4 см.

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

Несмотря на перечисленные выше факторы, по результатам измерений, полученных осевыми зондами с тороидальными антеннами и дипольно-осевыми зондами каротажа КС 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 с этими зондами.

В разделе 4.3 «**Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториальных зондов**» приведены результаты лабораторного моделирования макетов дипольно-экваториальных зондов, полученных в различных моделях пластов.

К сожалению, в случае дипольно-экваториальных зондов не было возможности сопоставить результаты лабораторного моделирования с расчётными данными в силу сложности получения последних. Однако 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.

На рис. 11, 12 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.

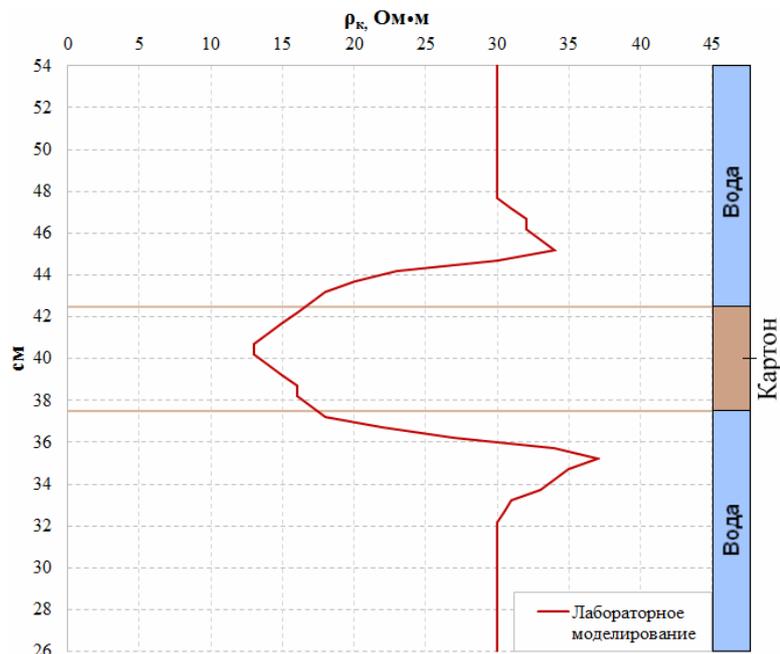


Рис. 11. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ($OO'=5$ см, $AB=1,2$ см, $MN=1,2$ см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 5 см.

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

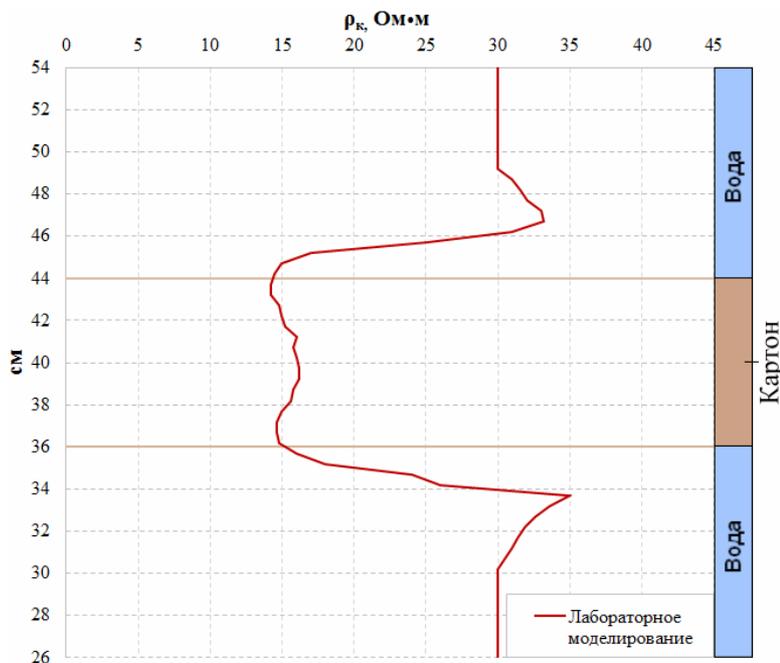


Рис. 12. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ($OO'=5$ см, $AB=1,2$ см, $MN=1,2$ см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 8 см.

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

Из результатов лабораторного моделирования, приведенных на рис. 11 и рис. 12, видно, что против моделей пройденных скважиной пластов с высокими значениями удельных электрических сопротивлений, по сравнению с ρ вмещающей их среды, были получены аномально низкие значения $\rho_{\text{к}}^{\text{ДЭЗ}}$. На основе математических расчётов было установлено, что такая нехарактерная для других зондов каротажа КС форма кривых $\rho_{\text{к}}^{\text{ДЭЗ}}$ против пластов с высокими значениями ρ обусловлена особенностями распределения индуцированных на границе скважины зарядов (источников вторичного поля $\mathbf{E}^{\text{В}}$) при возбуждении первичного электрического поля $\mathbf{E}^{\text{П}}$ поперечным оси скважины электрическим диполем AB .

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

В разделе 5.1. «Интерпретация результатов измерений, полученных при лабораторном моделировании» приведена методика определения значений $\rho_{\text{н}}$ и λ по данным, полученным дипольно-экваториальным зондом.

Для экспериментального подтверждения методики определения $\rho_{\text{н}}$ и λ были проведены измерения макетами дипольно-экваториальных зондов с различными параметрами. В качестве примера рассмотрим результаты измерений, полученных дипольно-экваториальным зондом ($L=4$ см, $AB=MN=0,7$ см) и дипольно-осевым зондом $A1B4M1N$ в модели пласта, состоящей из слоев картона ($H=10$ см), показанные на рис. 13 и рис. 14.

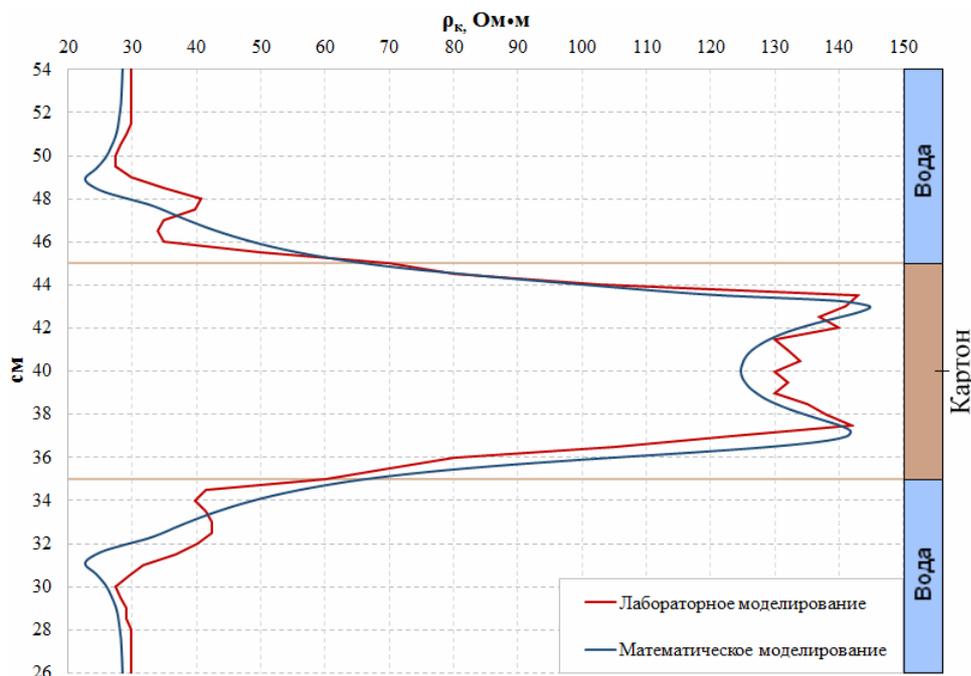


Рис. 13. Сопоставление результатов математического и лабораторного моделирования макета дипольно-осевого зонда $A1B4M1N$ для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.

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

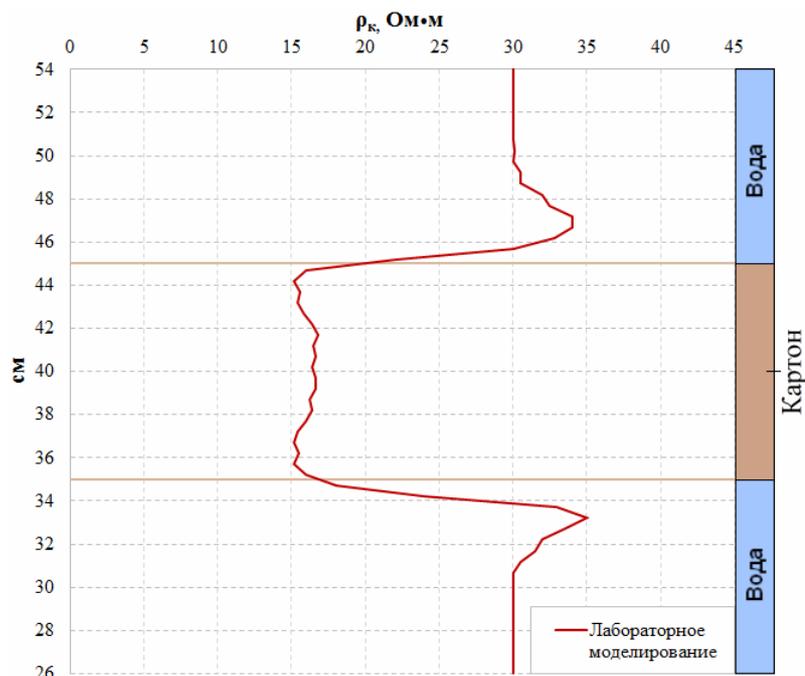


Рис. 14. Результаты лабораторного моделирования дипольно-экваториального зонда ($L=4$ см, $AB=0,7$ см, $MN=0,7$ см) для модели пласта с низким значением коэффициента анизотропии мощностью 10 см.

Лабораторное моделирование было проведено при следующих параметрах модели среды:

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

($\rho_t \approx 148 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_n \approx 190 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ получены в результате измерений на образце картона, $\lambda \approx 1,13$)

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

Полученные с ДЭЗ результаты лабораторного моделирования показали, что против модели пласта среднее значение $\rho_k^{\text{ДЭЗ}} \approx 16,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Тогда (при $\rho_c \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) 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 ρ_t/ρ_c , воспользуемся номограммой (рис. 15), полученной А.Д. Каринским на основе расчётов для соответствующей модели среды и параметров макета зонда.

При подстановке значений $\rho_t/\rho_c \approx 5$ и $\rho_k^{\text{ДЭЗ}}/\rho_c \approx 0,55$ (на рис. 15 отмечено красными линиями) получаем: $\lambda \approx 1,17$, $\lambda^2 \approx 1,32$. Зная λ и ρ_t , вычисляем значение поперечного удельного электрического сопротивления $\rho_n = \lambda^2 \cdot \rho_t \approx 1,32 \cdot 150 \text{ Ом}\cdot\text{м} \approx 198 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При определении продольного и поперечного удельного электрического сопротивления на образце картона (применённого при экспериментах) были получены следующие значения: $\rho_t \approx 148 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_n \approx 190 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, откуда $\lambda \approx 1,13$, что лишь незначительно отличается от полученных по номограмме значений ρ_n и λ .

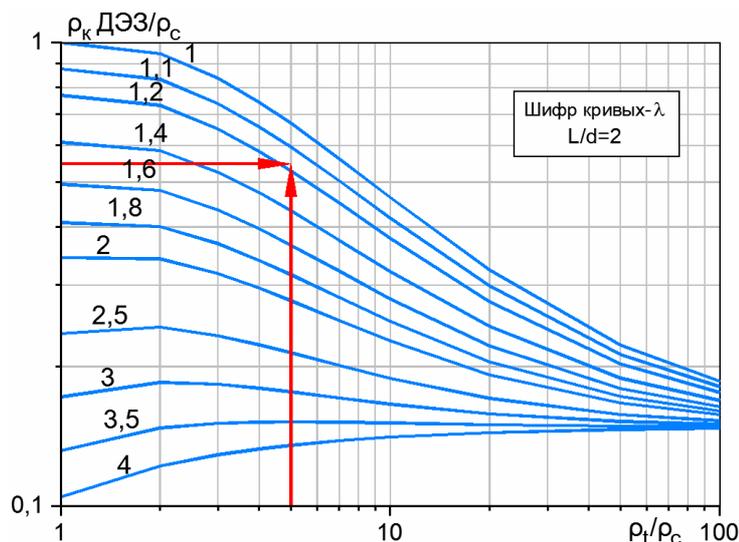


Рис. 15. Номограмма для определения коэффициента анизотропии λ по данным, полученным дипольно-экваториальным зондом ($L/d=2$ и отношению ρ_t/ρ_c)

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 λ пройденных скважиной горных пород.

В разделе 5.2. «**Возможность определения электрических параметров горных пород по результатам измерений, полученных дипольно-экваториальным зондом в скважине**» обоснована перспективность создания опытно-конструкторского образца дипольно-экваториального зонда с последующим испытанием его в скважинах.

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, искажающие результаты 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 искажающее влияние на результаты измерений.

3. В результате проведения лабораторного моделирования было установлено, что параметры окружающей модель скважины 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.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Издания из перечня ВАК:

1. **Каринский А.Д., Кауркин М.Д.** Математическое и лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа КС в изотропных и анизотропных моделях среды. Научно технический журнал “Геофизика”, 4.2013, с. 36-42.
2. **Каринский А.Д., Кауркин М.Д.** Физическое (лабораторное) и математическое моделирование дипольных зондов каротажа кажущихся сопротивлений с целью обоснования методики определения поперечного удельного электрического сопротивления анизотропных пластов. Научно технический вестник “Каротажник”, №248, 2015, с. 34-49.

Прочие издания:

1. **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.
2. **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 195-196.
3. **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. 190-193.
4. **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.

5. **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.
6. **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.
7. **Кауркин М.Д.** Результаты лабораторного моделирования осевых зондов с тороидальными антеннами и дипольно-осевых зондов каротажа. Электронное научное издание “Георазрез”, выпуск 2013.01 (13), 2013.
8. **Кауркин М.Д.** Результаты лабораторного и математического моделирования дипольных зондов электрического каротажа. XV Международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2014» материалы конференции, 2014, часть II с. 59-62.
9. **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.
10. **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. 108-109.
11. **Каринский А.Д., Кауркин М.Д.** Лабораторное и математическое моделирование дипольных зондов каротажа КС с целью обоснования методики определения параметров электрической анизотропии горных пород. XII Международная научно-практическая конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2015, том 1, с. 490-491.
12. **Кауркин М.Д.** Сопоставление результатов лабораторного моделирования зондов электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами и дипольно-осевых зондов каротажа КС. XII Международная научно-практическая конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2015, том 1, с. 492-493.
13. **Karinskiy A.D., Kaurkin M.D.** Laboratory and mathematical modeling of dipole- dipole probes resistivity logging to justify the method of determining electrical anisotropy parameters of rocks. XII International Scientific and Practical Conference "New ideas in Earth sciences". Moscow, 2015, pp. 158-159.
14. **Kaurkin M.D.** Comparison of the results of laboratory modeling of electromagnetic logging probes with toroidal antennas and dipole-axial resistivity probes. XII International Scientific and Practical Conference "New ideas in Earth sciences". Moscow, 2015, pp. 148-149.