

Российский государственный геологоразведочный университет  
имени Серго Орджоникидзе

*На правах рукописи*

**Красносельских Андрей Андреевич**

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
КАРОТАЖА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ  
ПОРОД**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков  
полезных ископаемых

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ГИС .....	10
1.1. Удельное электрическое сопротивление анизотропных пород и коэффициент электрической анизотропии.....	10
1.2. Электрическая анизотропия пород - коллекторов нефти и газа ...	16
1.3. Электрическая анизотропия пород, слагающих рудные месторождения .....	18
Выводы.....	33
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В МОДЕЛЯХ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ .....	34
2.1. Электрическое поле магнитного диполя в однородной анизотропной среде .....	34
2.2. Электрическое поле переменного магнитного диполя в присутствии анизотропного пласта в изотропной вмещающей среде .....	40
2.3. Оценка требований к допустимой погрешности измерений для зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента анизотропии $\lambda$ .....	44
Выводы.....	50
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА НОВОГО ПО КОНСТРУКЦИИ ЗОНДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА .....	52
3.1. Модели среды в лабораторных установках при физическом моделировании .....	52
3.2. Прототип зонда и измерительная аппаратура при физическом моделировании. ....	57

3.3. Технические решения, применённые для выявления влияния помех при физическом моделировании и для уменьшения влияния помех .....	64
3.4. Результаты физического моделирования прототипа нового зонда .....	67
Выводы.....	83
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АНИЗОТРОПИИ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	84
4.1. Методика определения коэффициента анизотропии по экспериментальным данным .....	84
4.2. Примеры определения коэффициента анизотропии по данным физического моделирования .....	87
Выводы.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
БИБЛИОГРАФИЯ.....	101

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы.

Многим горным породам присуща анизотропия по удельному электрическому сопротивлению  $\rho$  и, соответственно, по удельной электропроводности  $\sigma=1/\rho$ . Параметры электрической анизотропии горных пород содержат важную геолого-геофизическую информацию о строении и свойствах таких пород.

Диссертационная работа основана на полученных её автором результатах физического (лабораторного) моделирования для имеющего оригинальную конструкцию прототипа (модели) зонда электромагнитного каротажа. При выполнении определённых условий "показания" такого зонда зависят только от одного электрического параметра окружающей скважину среды – коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$ .

Влияние электрической анизотропии на результаты ГИС в последнее время всё больше привлекает внимание специалистов-геофизиков. И если раньше стояла задача в простом учете эффектов анизотропии для более достоверного определения удельного электрического сопротивления, то в настоящее время необходимость определения этого параметра вызывает основной интерес. Это связано в первую очередь с тем, что электрически анизотропные горные породы являются благоприятной средой для локализации некоторых полезных ископаемых.

Изучению влияния электрической анизотропии пород на результаты электрических и электромагнитных методов исследования скважин были посвящены работы многих известных ученых-геофизиков (Л. М. Альпин, М. И. Эпов, Ю. А. Дашевский, А.А. Кауфман, В. В. Вержбицкий, А. Е. Кулинкович, А. И. Сидорчук, Л. А. Табаровский, Е. В. Чаадаев, А. М. Каганский, А. Д. Каринский. и др. Появились также патенты на устройства и методику измерений, позволяющие решать подобную задачу в тех или иных условиях. Это, например, патент RU2380727 – «Устройство и способ определения

удельного сопротивления изотропного и анизотропного пласта при наличии проникновения» (авторы Барбер Томас Д., Боннер Стефен Д., Хоуман Дин М., Минербо Джеральд Н., Ростал Ричард А., Чен Куо-Чянг).

Проведенные ранее научным руководителем автора диссертационной работы теоретические исследования показали, что для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  горных пород может быть применён имеющий оригинальную конструкцию зонд электромагнитного каротажа. У этого зонда, как и у зондов индукционного каротажа (ИК) электромагнитное (ЭМ) поле возбуждает генераторная антенна  $G$  в виде замкнутого витка гармонически меняющегося тока  $I$  или «катушка» из таких витков. При малых линейных размерах антенны  $G$  по сравнению с расстояниями от генераторной антенны  $G$  до "измерителей поля" (датчиков)  $I$  такую генераторную антенну можно аппроксимировать переменным магнитным диполем с магнитным моментом  $M$ . Если, как в методе индукционного каротажа, датчик  $I$  аналогичен по конструкции генераторной антенне  $G$ , то измеряемое напряжение электрического поля в датчике пропорционально компоненте магнитного поля  $B$  (точнее - скорости её изменения со временем) по оси датчика  $I$ . Но при возбуждении ЭМ поля при помощи переменного магнитного диполя датчиком может служить также короткая измерительная линия  $MN$  с электродами  $M$ ,  $N$ , как, например, при каротаже сопротивления (КС). В этом случае напряжение электрического поля  $E$  в линии  $MN$  пропорционально компоненте поля  $E$  по направлению линии  $MN$ .

Экспериментальные исследования, проведенные автором диссертационной работы, потребовали создания имеющих оригинальную конструкцию прототипов зондов электромагнитного каротажа и конструирования ряда моделей пройденных скважиной анизотропных пластов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что результаты измерений с такими зондами позволяют определить коэффициент электрической анизотропии пройденных скважиной пластов.

**Объектом исследований** являются коэффициент электрической анизотропии пройденных скважиной горных пород.

**Цель работы** - экспериментальное, а также теоретическое обоснование методики определения коэффициента электрической анизотропии пород, пройденных скважиной, при применении имеющего оригинальную конструкцию зонда электромагнитного каротажа.

Для достижения цели исследований потребовалось **решение следующих задач**.

1. Создание различных лабораторных моделей пройденных скважиной анизотропных пластов и прототипов зондов электромагнитного каротажа.

2. Проведение лабораторных измерений для определения компонент электрического поля переменного магнитного диполя.

3. Изучение и учет влияния помех на результаты физического моделирования.

4. Анализ полученных экспериментальных результатов, их сопоставление с результатами математического моделирования.

5. Опробование методики определения коэффициента электрической анизотропии по результатам измерений с новым по конструкции прототипом зонда электромагнитного каротажа.

6. Оценка требований к допустимой погрешности измерений.

Основным методом исследования было физическое моделирование. При разработке методики интерпретации результатов экспериментальных исследований были проведены расчёты для моделей анизотропной среды.

### **Научная новизна работы**

1. Сконструированы оригинальные лабораторные установки, включающие прототипы зонда электромагнитного каротажа и модели пройденных наклонной скважиной электрически анизотропных пластов в изотропной вмещающей среде.

2. Принятые при экспериментальных исследованиях решения: фильтрация сигнала, специальные материалы (коаксиальный кабель,

ферритовые фильтры), а также методика измерений с двумя взаимно-ортогональными измерительными линиями  $MN$ , позволили значительно уменьшить влияние электромагнитных помех на результаты физического моделирования.

3. Сравнение результатов физических экспериментов, полученных для трёхмерной модели среды, и расчетов для более простой одномерной модели показало, что проводящая скважина не оказывает существенного влияния на показания рассматриваемого в этой работе зонда электромагнитного каротажа.

4. Экспериментально подтверждено, что для результатов измерений на сконструированных лабораторных установках справедливы те же закономерности влияния коэффициента электрической анизотропии, частоты, угла между осью анизотропии и осью зонда, что были ранее установлены при теоретических исследованиях для более простых, чем при физических экспериментах, моделей среды.

5. Экспериментально доказано то, что по результатам измерений с применённым при исследованиях зондом электромагнитного каротажа при остром угле между осью зонда и осью анизотропии можно выявлять электрически анизотропные пласты и определять их коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$  при его изменении в пределах от 1.005 до первых единиц.

### **Основные защищаемые положения.**

1. Результаты физического моделирования для трёхмерных моделей среды показали, что при измерениях в модели скважины параметры окружающей скважину среды и характеристики зонда оказывают влияние на результаты измерений, близкое к тому, которое было ранее определено по результатам математического моделирования для более простых моделей среды.

2. По результатам измерений с зондом новой конструкции в моделях пластов, пройденных скважиной, при остром угле  $\alpha$  между осью скважины и

осью анизотропии пласта, можно выделить электрически анизотропные пласты в изотропной вмещающей среде.

3. Доказано, что при определённых условиях по результатам измерений с прототипом зонда электромагнитного каротажа новой конструкции можно количественно определить коэффициент анизотропии пройденных скважиной пластов.

### **Степень достоверности результатов**

О достоверности результатов исследований свидетельствуют данные, полученные при сравнении результатов лабораторных экспериментов при проведении измерений с разными измерительными приборами. Её подтверждает также сравнение результатов физического и математического моделирования.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», 2013; VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле», 2014; XII Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», 2015; 2-ая научно-практическая конференция «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири», 2015; VIII научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире», 2015; VIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о земле», 2016.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе две статьи в печатных изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, одна статья в электронном научном издании и семь тезисов докладов. Статьи опубликованы в научно-технических журналах «Геофизика», «Руды и металлы» и в электронном научном издании «Георазрез».



### Личный вклад

Вклад автора в результаты, представленные в этой работе, заключается в создании лабораторных установок и прототипов имеющих новую конструкцию зондов электромагнитного каротажа, проведении физических экспериментов, обработке полученных результатов измерений, изучении особенностей влияния помех на результаты измерений и принятии мер к уменьшению этого влияния, анализе экспериментальных данных и разработке методики интерпретации результатов измерений.

Диссертация состоит из 4-х глав, введения и заключения, содержит 112 страниц машинописного текста, 48 рисунков, 4 таблицы, библиографию из 115-и наименований.

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

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук А. Д. Каринскому за предоставление интересной темы диссертационной работы, поддержку на всех этапах проведения исследования, постоянное внимание при написании данной работы. Автор признателен заведующему отделом геолого-экономической оценки месторождений ФГУП ЦНИГРИ Д. А. Куликову за поощрение научных исследователей соискателя, старшему научному сотруднику А. А. Черемисину за консультации по вопросам, связанным с рудной геологией и кандидату технических наук М. Д. Кауркину, за полезные советы по вопросам, связанным с методикой физического моделирования.

# ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ГИС

## 1.1. Удельное электрическое сопротивление анизотропных пород и коэффициент электрической анизотропии

В изотропной среде физические параметры среды (удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость и т. д.) не зависят от направления. В анизотропной среде эти параметры (оказывающие влияние на то или иное физическое поле) зависят от направления этого поля.

Среду характеризуют разные физические параметры, количественно определяющие те или иные свойства среды (электрические, магнитные, упругие, тепловые и т.д.). Поэтому различают анизотропию среды по разным физическим параметрам. Одна и та же среда может проявлять изотропию по одним физическим свойствам и анизотропию по другим.

Электрическая анизотропия осадочных горных пород (в частности пород - коллекторов углеводородов) может быть связана с условиями их образования. Это связано с особенностями формирования осадочных пород, обычно сопровождающегося многократными изменениями режима осадконакопления с соответствующими изменениями состава и дисперсности материала осадков. Этот процесс часто приводит к формированию слоистой или тонкослоистой структуры осадочных толщ и анизотропии их физических параметров.

В рудной геологии анизотропия представляет интерес в первую очередь для поиска толщ, благоприятных для рудообразования. Было установлено, например, что электрически анизотропные породы с рассеянным углистым веществом благоприятны для локализации коренных месторождений золота. Это связано с тем, что именно в такой обстановке осаждающее действие углистого вещества, как активного восстановителя, проявляется наиболее эффективно.

Магматические породы, как правило - изотропны, по причине их образования в результате застывания из жидких расплавов. Однако нужно отметить, что при длительном застывании крупного магматического тела неизбежен процесс расслоения магмы под действием силы тяжести на более тяжелые и более легкие разности. К тому же обычно массив магмы внедряется и застывает во вмещающей среде не за одну фазу. Чаше магматическая деятельность сопровождается многократным внедрением порций расплавленной магмы.

Метаморфическим породам может быть свойственна анизотропия в случаях, когда процессы преобразования не сказались на изначальной слоистой структуре пород, или привели к образованию многочисленных поверхностей разрыва геологической толщи, иначе говоря – рассланцеванию. Под действием ряда факторов (тектоническая активность, процессы выветривания и т. п.) магматические и метаморфические породы могут приобрести трещиноватость, которая, как правило, имеет одно (реже несколько) преобладающих направлений.

Итак, можно выделить несколько факторов, которые обуславливают электрическую анизотропию горных пород:

- тонкослоистое строение толщи осадочных горных пород;
- рассланцевание в метаморфических породах;
- направленное (имеющее определённую ориентацию) растрескивание массива осадочных, метаморфических или магматических пород;
- чередование изотропных разностей с отличающимися друг от друга электрическими свойствами в пределах единой анизотропной толщи.

Первые три случая характеризуют проявление свойств анизотропии на микроскопическом уровне, подобные анизотропные среды получили название микроанизотропных, в последнем случае, когда свойства анизотропии проявляются на макроскопическом уровне среда – макроанизотропная. Надо иметь в виду, что при геофизических исследованиях скважин понятия "микроанизотропия" и "макроанизотропия" являются условными, так как

зависят от разрешающей способности каротажных зондов. Характерными примерами макроанизотропных горных пород могут служить: чередование прослоев песчаников (алевролитов) и глин (аргиллитов), рис. 1.1, трещиноватые магматические породы: граниты, диориты, сиениты, габбро и др. Примерами микроанизотропных пород являются толщи углей, сланцев (рис. 1.2).



**Рис. 1.1.** Пример анизотропной осадочной терригенной толщи



**Рис. 1.2.** Пример анизотропной горной породы: мусковит-альбит-кварцевый сланец с графитом

Для характеристики электрических параметров анизотропных горных пород, как правило, применяют модель среды с осевой анизотропией. Удельное электрическое сопротивление такой среды характеризуют два значения: поперечное удельное электрическое сопротивление  $\rho_n$  по оси анизотропии  $n$  (ориентированной, например, по нормали к напластованию тонкослоистых

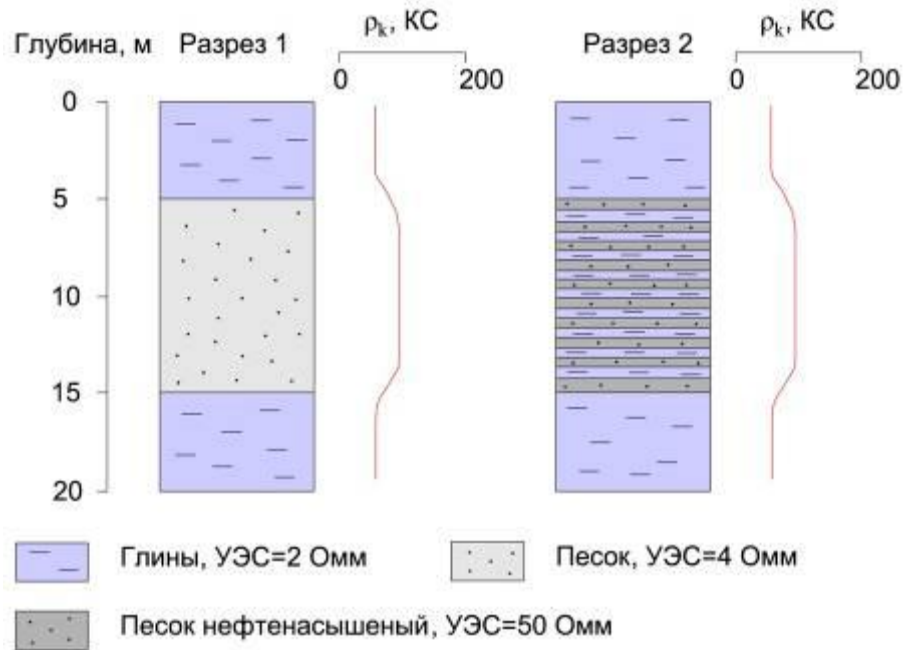
пород) и продольное удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$  по любому направлению  $t$ , ортогональному оси  $n$  (рис. 1.1, 1.2). Коэффициент анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t} = \sqrt{\sigma_t/\sigma_n}$ . Здесь  $\sigma_n=1/\rho_n$ ,  $\sigma_t=1/\rho_t$  – удельные электропроводности по направлениям  $n$  и  $t$ . В электрически изотропных средах, коэффициент электрической анизотропии  $\lambda=1$ , так как  $\rho_n=\rho_t$ . В анизотропных средах  $\rho_n>\rho_t$ , и  $\lambda>1$ .

Для геологических сред, в частности пластов коллекторов углеводородов, явление электрической анизотропии было установлено в 20-х годах прошлого века [101]. Впоследствии исследователи столкнулись с эффектом, который получил название «парадокс анизотропии».

Например, для линейных установок в методах сопротивления электроразведки при их ориентации по оси анизотропии  $n$  горных пород на величину определяемого по результатам измерений кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  оказывает влияние не величина  $\rho_n$  этих пород, а параметр  $\rho_t$ .

Подобным образом влияние парадокса анизотропии проявляется и на результатах измерений при каротаже сопротивления (КС) при применении градиент - зондов и потенциал - зондов и при их ориентации по оси анизотропии пройденных скважиной пород (рис. 1.3). Значения  $\rho_k$ , определяемые по результатам таких измерений, зависят, в основном, от параметра  $\rho_t$  анизотропных пород.

На рис. 1.3 схематично показаны кривые  $\rho_k$  для потенциал-зонда КС против изотропного водонасыщенного пласта и пласта, представленного частым чередованием нефтенасыщенных прослоев и глин. Как видно на этом рисунке, кривые КС против пластов практически идентичны, хотя эти пласты значительно различаются по типу насыщения и параметру  $\rho_n$ . Отсюда следует, что решить задачу определения типа насыщения пластов на рис. 1.3, методами КС - практически невозможно, так как параметр  $\rho_n$  не оказывает существенного влияния на значение кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$ , определяемого по результатам КС.



**Рис. 1.3.** Пример влияния парадокса анизотропии на результаты измерений в каротаже сопротивления

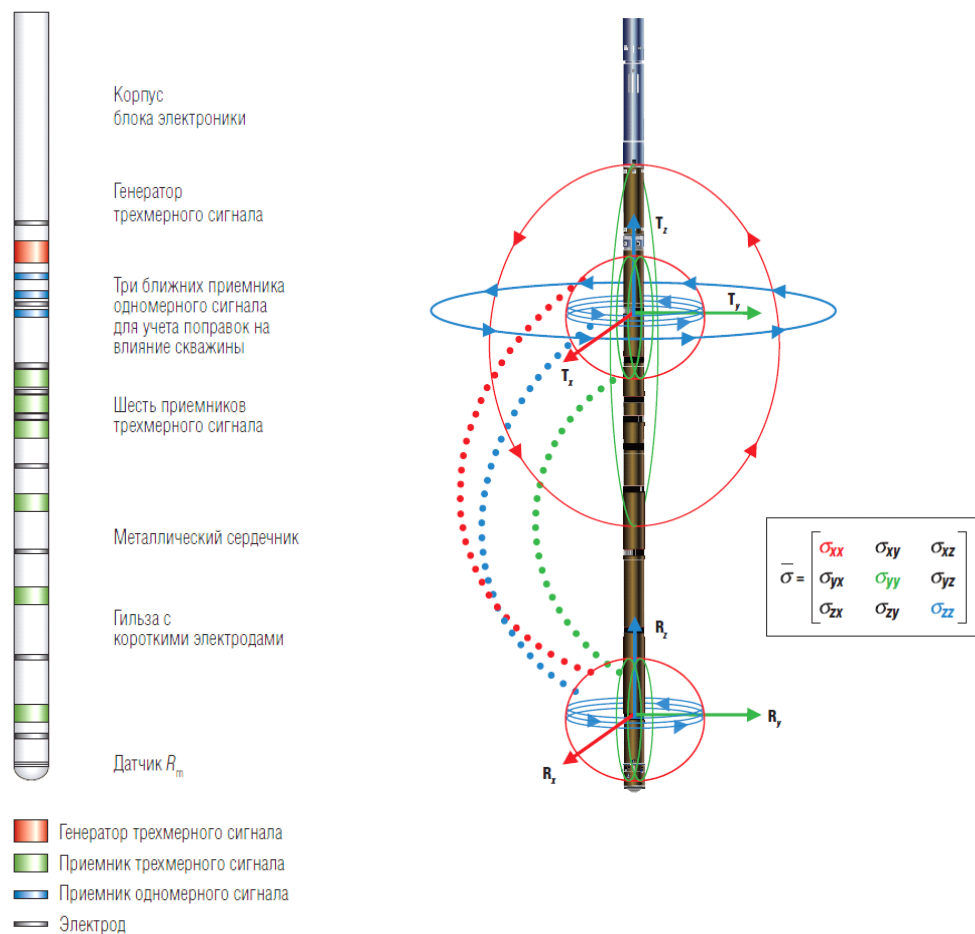
Некоторые исследователи полагают, что единственным методом каротажа КС, способным, в принципе, определить параметр  $\rho_n$ , является метод бокового каротажного зондирования (БКЗ) [12]. Особенностью измерения этим методом заключается в использовании многоэлектродной установки, что при выполнении некоторых условий позволяет получить информацию о поперечном удельном электрическом сопротивлении.

На начальном этапе изучения эффектов анизотропии исследователи ограничивались только задачей установления и учета влияния этого явления на искажение показаний стандартных методов каротажа [13]. Затем возникали попытки судить по результатам анализа этих искажений о коэффициенте анизотропии [27]. Однако впоследствии стало ясно, что для оценки практически важных геолого-геофизических параметров горных пород этого уже недостаточно. В 1970 г. И. Е. Эйрман получил авторское свидетельство № 272448 на изобретенный им способ индукционного каротажа, направленный на определение поперечной проводимости.

В настоящее время зондом, по результатам измерений с которым есть принципиальная возможность определить все параметры электрической

анизотропии пройденных скважиной горных пород ( $\rho_t$ ,  $\rho_n$  и  $\lambda$ ) является зонд трёхмерного индукционного каротажа Rt Scanner компании Schlumberger [7].

На рис. 1.4 представлена схема зонда Rt Scanner. Как видно на этом рисунке, зонд имеет сложную конструкцию, состоит из большого числа узлов: генератора, приемников одномерного и трехмерного сигнала, электродов. В связи с этим измерения, проводимые Rt Scanner, вряд ли можно назвать экспрессными, а обработка и интерпретация результатов измерений с таким зондом - очень сложная задача, требующая высокопроизводительных вычислительных мощностей, специально разработанных алгоритмов для интерпретации полученных результатов. Занимаются подобными измерениями и интерпретацией только специалисты названной выше компании, что наверняка оказало влияние на малую доступность исследований скважин с зондом RtScanner.



**Рис. 1.4.** Зонд трёхмерного индукционного каротажа RtScanner

## 1.2. Электрическая анизотропия пород - коллекторов нефти и газа

Приведем примеры условий, при которых определение коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  или поперечного удельного электрического сопротивления  $\rho_n$  может помочь решению геологических задач промысловой геологии.

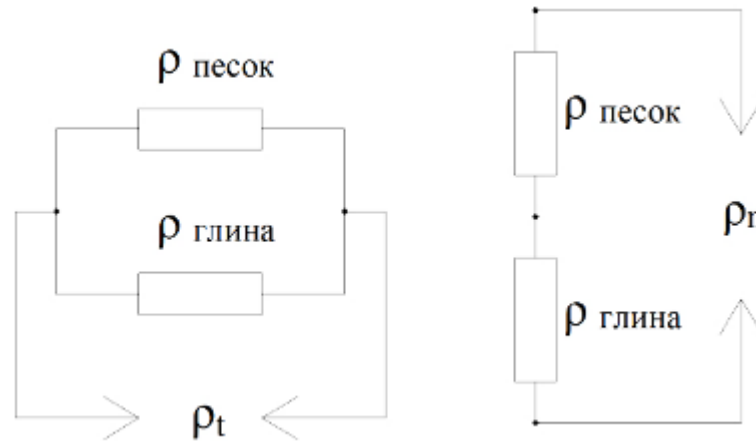
В первую очередь речь пойдет о тонкослоистых коллекторах (рис. 1.3, разрез 2). Примером могут служить отложения ачимовской толщи и тюменской свиты (Западная Сибирь), где на долю тонкослоистых коллекторов приходится от 70 до 90% продуктивных интервалов разрезов скважин. Такие пласты-коллекторы представлены частым чередованием маломощных (от 0.1 до 1.0 м) проницаемых песчано-глинистых разностей пород и непроницаемых глинистых, углистых, и плотных карбонатных слоев толщиной от первых сантиметров до десятков сантиметров.

В условиях неоднородности разреза с такими параметрами можно говорить об эквивалентности его макроанизотропной среде, имея в виду, что большинство применяемых зондов электрического и электромагнитного каротажа имеют расстояние между источником и приемником не менее 0.5 м. В силу известного парадокса анизотропии [3] сигнал, измеренный в зондах каротажа КС (БКЗ), зависит практически только от продольного ("горизонтального") удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  и практически не зависит от параметров  $\rho_n$  и  $\lambda$ .

Этот эффект можно объяснить шунтированием тока при наличии проводящих флюидонепроницаемых микрослоёв. Эквивалентная электрическая схема для иллюстрации этого представлена на рис. 1.5. Измерение удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  в этом случае формально аналогично измерению сопротивления параллельно соединенных резисторов, где основной вклад в сопротивление внесет сопротивление резисторов с низким сопротивлением. В отличие от этого значение удельного электрического сопротивления  $\rho_n$  будет больше зависеть от величины наибольшего



сопротивления (электротехнический аналог – последовательное соединение резисторов).



**Рис. 1.5.** Эквивалентная электрическая схема измерения при влиянии парадокса анизотропии

В этих же условиях на результаты измерений с широко применяемыми зондами электромагнитного каротажа (ИК, ВИКИЗ) также основное влияние оказывает продольное удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$ , из-за особенностей процесса измерения подобными зондами. Векторы вихревого электрического поля, возникшего под действием первичного магнитного поля генераторной катушки, лежат в плоскостях, ортогональных оси этой катушки. В условиях горизонтально-слоистого разреза и вертикальной скважины только в разрезах с мощными однородными пластами можно определить  $\rho_k$  близкое к параметру  $\rho_t$ .

Таким образом, во многих случаях влияние эффектов анизотропии может привести к пропуску продуктивного коллектора или в случаях когда подобный коллектор удалось выявить, нужно учитывать, что фильтрационно-емкостные свойства такого коллектора определяют на основе данных о его удельной электропроводности или удельном электрическом сопротивлении, описанный выше эффект приведет к занижению величины коэффициента нефтенасыщенности  $K_n$  и к ошибке при определении запасов месторождения [6].

Во-вторых, есть сложнопостроенные коллекторы, например месторождений Вала Гамбурцева Тимано-Печерской нефтегазоносной провинции (НГП) [61]. Запасы углеводородов этих месторождений связаны с коллекторами, представленными известково-доломитовой толщей, образованной в результате нескольких циклов седиментогенеза при изменчивых условиях осадконакопления. Активные тектонические процессы, происходившие в более поздние периоды геологической истории месторождений, привели к сложному разломно-блоковому строению месторождений. При учёте фациальной изменчивости по вертикали последняя безусловно, ведет к электрической анизотропии пород, слагающих это месторождение. Данные стандартного комплекса геофизических исследований скважин (ГИС): БК, ИК, ГК, НГК, АК, профилометрия, инклинометрия – не позволили однозначно выбрать интервалы перфорации в скважинах, хотя в поисковых скважинах было установлено наличие притоков углеводородов. Подобное происходит, когда связь между основными петрофизическими параметрами пород-коллекторов и наличием в них углеводородов либо отсутствует, либо не достоверно установлена.

### **1.3. Электрическая анизотропия пород, слагающих рудные месторождения**

Электрическая анизотропия горных пород может быть благоприятным условием, для локализации некоторых месторождений рудных полезных ископаемых. Эта тематике в литературе уделено гораздо меньше внимания, чем вопросам, связанным с анизотропией горных пород в промышленной геологии. В последнее время в отечественной рудной геологии геофизические методы, к сожалению, решают все меньше и меньше задач. В связи с этим целесообразно изложить свои соображения особенно подробно именно по этому вопросу.

Определим сначала то, какие обстановки, сопровождающиеся анизотропией электрических свойств горных пород, ведут к формированию рудных месторождений. Будем иметь в виду, что месторождение – это аномальная концентрация полезного компонента (или компонентов), которая на

достигнутом уровне техники и технологии позволяет выгодно начать производство по его добыче. Чтобы понять, где месторождения локализованы, геологи оперируют так называемыми поисковыми признаками – факторами, указывающими на наличие оруденения. По совокупности поисковых признаков происходит оконтуривание – сокращение зоны исследования с целью нахождения скопления полезного ископаемого. Чтобы быстрее и с возможно меньшими затратами производить этот процесс, геологи постоянно проводят работу по установлению все более надежных связей поисковый признак – полезное ископаемое. Это происходит с накоплением знаний о геологическом строении земной коры и, главным образом, об изменениях, протекающих в ней. Часть этих процессов приводит к увеличению концентрации полезного компонента в ограниченной области – они называются рудообразующими и ведут к возникновению месторождений.

Существует много классификаций месторождений. Приведём здесь определение генетической классификации месторождений. В её основе лежит принцип образования горных пород – минеральных масс, образующих месторождения полезных ископаемых. Подобная закономерность была положена в основу любых известных рудогенетических классификаций. В этой области наиболее значимый вклад внесли следующие ученые: К.И. Богданович (1912), Л. Де Лоне (1913), В. Эмонс (1918), А.Н. Заварицкий (1926), В. Лингрен (1932), В.А. Обручев (1934), Г. Шнейдерхен (1958), Ч. Парк и Р. Макдиармид (1963), В.И. Смирнов (1965, 1969, 1976, 1982), И.Ф. Романович (1986), Чжай Юй Иен (1990) и других.

Наиболее популярной среди отечественных геологов принято считать, ставшую хрестоматийной, классификацию В. И. Смирнова. Согласно последней все месторождения полезных ископаемых подразделяют на три серии: эндогенную, экзогенную и метаморфогенную. Каждая серия в свою очередь разделена на группы, а последние на классы (табл. 1.1) [68].

Таблица 1.1

## Сводная генетическая классификация месторождений полезных ископаемых

Группа	Класс	Типы месторождений
Эндогенная серия		
Магматическая	1. Ликвационный	а) сульфидные медно-никелевые в основном в ультраосновных комплексах; б) хромитовые, титаномагнетитовые и руды элементов платиновой группы в расслоенных ультраосновных комплексах в) редкие, редкоземельные и рассеянные элементы в щелочных комплексах
	2. Раннемагматический	Магматические горные породы, алмазоносные кимберлиты и лампроиты
	3. Позднемагматический	Хромитовые, титаномагнетитовые и апатит-нифелиновые
Карбонатитовая	Флюидно-магматический карбонатитовый	Перовскит-титаномагнетитовые, камафоритовые, редкометальные, пироклоровые, редкоземельные и флюоритовые
Пегматитовая	1. Магматогенный	Керамические, мусковитовые, редкометалльные и цветных камней
	2. Флюидно-анатектонический	Редкометально-пироклоровые и апатит-нифелиновые
	3. Флюидно-метаморфогенный	Керамических, мусковитовых, редкометалльных пегматитов, цветных камней
Скарновая	1. Известковый	Железорудные, вольфрам-молибденовые, медно-молибденовые, свинцово-цинковые
	2. Магнезиальный	Железорудные, медно-молибденовые, оловорудные, борные
Альбит-грейзеновая	1. Альбититовый	Бериллиевые, литиевые урановые и редкоземельные
	2. Грейзеновый	Олово-вольфрамовые, литиевые, бериллиевые
Гидротермальная	1. Плутогенный	Штокверковые и жильные а) высокотемпературные медно-молибденпорфиоровые, золото-, олово-, медно-кварцевые; б) среднетемпературные полиметаллические, сурьяно-мышьяковые, редкометалльные, ураноносные; в) низкотемпературные сидеритовые, родохрозитовые, магнезитовые, хризотил-асбестовые, баритовые, флюоритовые
	2. Вулканогенный андезитовый	золото-серебряные, олово-вольфрамовые ртутные, медные, алунитовые, исландского шпата, самородной серы
	3. Вулканогенно-осадочный, базальтоидный, субмаринный	Колчеданные, медноколчеданные, колчеданно-полиметаллические

Группа	Класс	Типы месторождений
Экзогенная серия		
Выветривания	1. Остаточный	Никель-кобальтовые, бокситовые, редкометалльные, каолиновые, апатитовые, марганцевые
	2. Инфильтрационный	Редкометалльно-урановые
Осадочная	1. Механический россыпной	Гравийные, песчаные и глинистые (огнеупорные, бентонитовые) а) континентальные россыпные золотые, платиновые, касситеритовые, алмазные, танталит-колумбитовые, корундовые; б) Литоральные россыпные рутиловые, ильменитовые, циркониевые касситеритовые, алмазные, цветные камни
	2. Хемогенный	а) гидрооксидные, суспензионно-коллоидные: бурых железняков, марганца, железо-марганцевых конкреций и корок; б) сульфидно-сульфатно-карбонатные цветных и редких металлов в черных сланцах; в) сульфатно-галоидные: каменных, калийных солей боратов, лития
	3. Биохемический	Фосфоритовые (континентальные и прибрежно-морские) кремнистые породы (диатомиты, трепел, опоки), известняки, угли, горючие сланцы, торф
	4. Осадочно-катагенетический	Медистых песчаников, свинцово-цинковые в карбонатных породах, свинцовые в песчаниках, золоторудные и урановые в терригенно-карбонатных и черно-сланцевых толщах, самородной серы, нефти и газа, йодобромистых и металлоносных растворов
Метаморфогенная серия		
Метаморфизованная	1. Регионально-метаморфизованный	Железорудные, марганцевые, золото-урановые, апатитовые, колчеданные
	2. Контактново-метаморфизованный	Железорудные, графитовые, корундовые, скарнированные
Метаморфическая	1. Зеленосланцевый	Горного-хрусталя, золото-кварцевые, мрамора, кварциты, кровельные сланцы
	2. Амфиболитовый	Андалузитовые, кианитовые, силлиманитовые, наждака, амфибол-асбестовые
	3. Гранулит-эклогитовый	Гранатовые, рутил-ильменитовые, флогопитовые
	4. Импаковый	Алмазные

**Магматогенные месторождения.** Их называют также эндогенными или гипогенными и связывают с внутренней энергией Земли. В данной серии выделяют шесть групп. Две группы – магматическая и карбонатитовая образуются из расплавов в процессе их дифференциации и ликвации,

связанных со средними, основными и ультраосновными магмами. Четыре остальных группы – пегматитовая, альбитит-грейзеновая, скарновая и гидротермальная – ассоциируют с кислыми, средними и щелочными магматическими комплексами и формировались на позднеинтрузивной и постинтрузивной стадиях их становления.

**Экзогенные** (поверхностные, гипергенные, седиментогенные) **месторождения** формировались вследствие механической и биохимической дифференциации вещества земной коры под влиянием солнечной энергии. Традиционно здесь выделяют две группы: выветривания, связанную с древней и современной корой выветривания и осадочную, формирующуюся при механическом разрушении тел полезных ископаемых при активном участии континентальных и морских вод, а также возникающую при механической, химической, биохимической и вулканической дифференциации минерального вещества в поверхностной части земной коры в процессе накопления осадочных толщ.

**Метаморфогенные месторождения** возникают в глубинных зонах земной коры под воздействием господствующих там высоких давлений и температур. В этой серии выделяют две группы рудных образований: метаморфизованную, включающую преобразованные в новой термодинамической обстановке ранее возникшие месторождения любого генезиса и, собственно, метаморфические, образовавшиеся впервые в результате метаморфогенного преобразования минерального вещества или обусловленные процессами гидротермально-метаморфогенного концентрирования рассеянных рудных элементов или их соединений.

В *магматической группе* месторождений выделяют три класса: ликвационный, раннемагматический и позднемагматический. В первом случае рудная магма разделяется на рудную и силикатную составляющую, для раннемагматических месторождений характерно затвердевание полезных компонентов в виде минералов ранней стадии кристаллизации на начальном

этапе, для позднемагматических – на завершающем этапе, после образования силикатных минералов.

Следует иметь в виду, что каждое известное в настоящее время месторождение магматического типа представляет собой реализацию одновременно всех трех путей образования рудных минералов в разном соотношении, что связано с неравномерностью, стадийностью и импульсностью внедрения порций магматических расплавов. Рассмотрим типичный пример ликвационных месторождений – медно-никелевые месторождения Норильской группы. Они связаны с минерализованными триассовыми силлами. В лежащем боку силлов выделены горизонты сплошных руд, в кровле развиты вкрапленные, а в подошве и вмещающих породах прожилково-вкрапленные руды. В настоящий момент запасы богатых, легкообогатимых сплошных руд подходят к концу, к промышленному освоению готовят другие типы руд. Тот факт, что Норильская группа месторождений и подобные ей, как правило, отличаются зональным строением, может приводить к тому, что с показателями электрической анизотропии могут быть связаны практически значимые параметры вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд, тем более что по удельному электрическому сопротивлению последние менее контрастны с вмещающими породами, чем сплошные сульфидные руды.

*Ранне- и позднемагматические месторождения* из-за особенностей образования менее подвержены развитию анизотропных свойств у пород и руд. Зональное строение залежей полезных компонентов отмечается в этой группе только у апатит-нефелиновых руд, например на месторождениях Хибинского массива щелочных пород. Микроанизотропные свойства также не проявлены.

Месторождения *карбонатитовой группы* связаны с карбонатитовым комплексом пород в пределах сложных комплексных полифазных интрузий. И, несмотря на то, что к этому типу принадлежат многие уникальные и крупные месторождения, такие как Маунтин Пасс (США), Ковдор (Россия) и т.д. – однозначной связи между анизотропными свойствами и рудами не выявлено.

Месторождения *пегматитовой группы* связаны с продуктами поздних стадий раскristализации силикатных расплавов, насыщенных флюидными компонентами. Для них характерно либо гнездовое, либо полосчатое обособление мономинеральных блоков. Можно ожидать аномальные значения коэффициента электрической анизотропии, связанные с обособленными зонами слюды, например мусковита, среди разностей плагиоклаза или кварца. Таким образом, аномалии  $\lambda$  могут служить поисковым признаком месторождений мусковита. В России такие месторождения известны на территории Карелии и в Забайкалье.

*Скарновая группа* месторождений, по мнению большинства современных исследователей, связана с одноименными породами неоднозначно. Скарнами обычно называют породы, образовавшиеся в приконтактных областях интрузивов среди карбонатных или силикатных пород. Примерами подобных месторождений являются Тырнауз, Гора Магнитная и т.д. Устойчивый признак оруденения и анизотропных свойств здесь установить сложно, так как в настоящее время у исследователей нет надежных геофизических поисковых признаков такого оруденения, одинаково проявляющих себя на месторождениях этой разнородной группы.

*Альбитит-грейзеновая группа* месторождений локализуется в зонах в апикальных частях массивов кислого и щелочного состава. Рудные минералы, содержащие полезные компоненты таких месторождений, привносятся в альбититы и грейзены на завершающих стадиях их формирования. Это обстоятельство не позволяет судить о связи анизотропии пород с наличием или отсутствием полезных компонентов. В качестве примера данной группы выступает месторождение ниобия – Каффа (Нигерия).

*Гидротермальные* месторождения представляют собой промышленные минеральные скопления, созданные циркулирующими под поверхностью земли горячими, обогащенными полезными компонентами газовой-жидкими растворами. Плутогенный класс ассоциирует с гранитоидным магматизмом и выражен в форме жил и штокверковых образований. Это такие известные



месторождения как Березовское (золото), Омсукчан (олово), Бакал (железо). Месторождения вулканогенные андезитовидные связаны с палеовулканическими постройками вулканоплутонических поясов (наиболее известный – Тихоокеанский), где на территорию России приходится Охотско-Чукотская его часть с такими месторождениями золота и серебра как Дукат, Карамкен и т.д. К классу вулканогенно-осадочные месторождений относятся скопления сульфидных руд, связанные с подводно-морскими базальтоидными формациями. В частности речь идет о колчеданных, медно-колчеданных месторождениях Урала (Гайское, Сибайское и т.д.) и колчеданно-полиметаллических Рудного Алтая (Рубцовское, Степное и т.д.). Ясно, что внедрение растворов, положивших начало всех месторождений этого класса, невозможно ни в какие другие участки земной коры, кроме как сложенные нарушенными и трещиноватыми породами, установить однозначную связь подобного класса месторождений и изменения анизотропных свойств – сложная задача.

Группа месторождений *выветривания* образовались в результате процессов выветривания в основном в континентальных условиях, реже подводных. С учетом того, что интенсивность процессов может изменяться с течением времени, возможно образование анизотропных толщ, причем изменение параметров анизотропии может отвечать характеру изменения интенсивности оруденения. Примеры месторождений: Михайловское (железо), Средне-Тиманская группа месторождений (бокситы).

Первый класс осадочных месторождений представлен *россыпями* золота (р. Колыма), платины (Кондер), алмазов (аллювиальные и карстовые россыпи Якутия), ильменит-рутил-циркон-монацита (Флорида США), олова (Северо-Восток России), магнетита (о. Сахалин), янтаря (Калининградская обл.), цветных камней и техногенные россыпи в хвостохранилищах старых горнорудных предприятий. Достоверных предпосылок для установления надежных связей между параметрами подобного оруденения и электрической анизотропией к настоящему моменту нет.

*Хемогенный класс* включает месторождения таких полезных ископаемых как соли каменные (оз. Кара-Богаз-Гол), железо и марганец, в том числе железомарганцевые конкреции мирового океана. Образование месторождений происходит в результате накопления материала, выпавшего в осадок из раствора, например минералы соли – морская вода. Как многие осадочные процессы, этот протекает на протяжении значительного периода времени, в ходе которого внешние условия зачастую изменяются, что приводит к возникновению слоистости, а значит можно ожидать проявление свойств электрической анизотропии.

Месторождения *биохемического класса* образуют залежи углей, торфа и горючих сланцев, а также фосфоритов. На территории России находится немало угольных бассейнов: Кузнецкий, Печерский, Канско-Ачинский, Тунгусский и т.д. Каменному углю свойственно микроанизотропное строение, кроме того в угольной геологии существует важная задача определение истинной мощности угольного пласта при развитии у него «ложных» кровли и почвы. На сегодняшний день она решается только геофизическими методами (электрический и радиоактивный каротаж).

*Осадочно-катагенетические* месторождения сформированы потоками поверхностных грунтовых и артезианских подземных вод и углеводородных флюидов, а также низкотемпературных гидротермальных растворов различного происхождения. В этом классе объединены месторождения таких полезных ископаемых, как меди (Удокан), полиметаллов, ванадия, урана, стронция, рения, селена, скандия, серы, золота в теригенно-карбонатных и черносланцевых толщах (Сухой Лог) и, конечно, в эту группу входят месторождения углеводородов.

Влияние анизотропных свойств пород на важные геолого-геофизические параметры месторождений нефти и газа описано многими исследователями (см. выше), в то же время для месторождений металлических полезных ископаемых эти зависимости изучены недостаточно. Это может быть связано с поэтапным (от поисков к разведке) уменьшением объемов геофизических исследований на

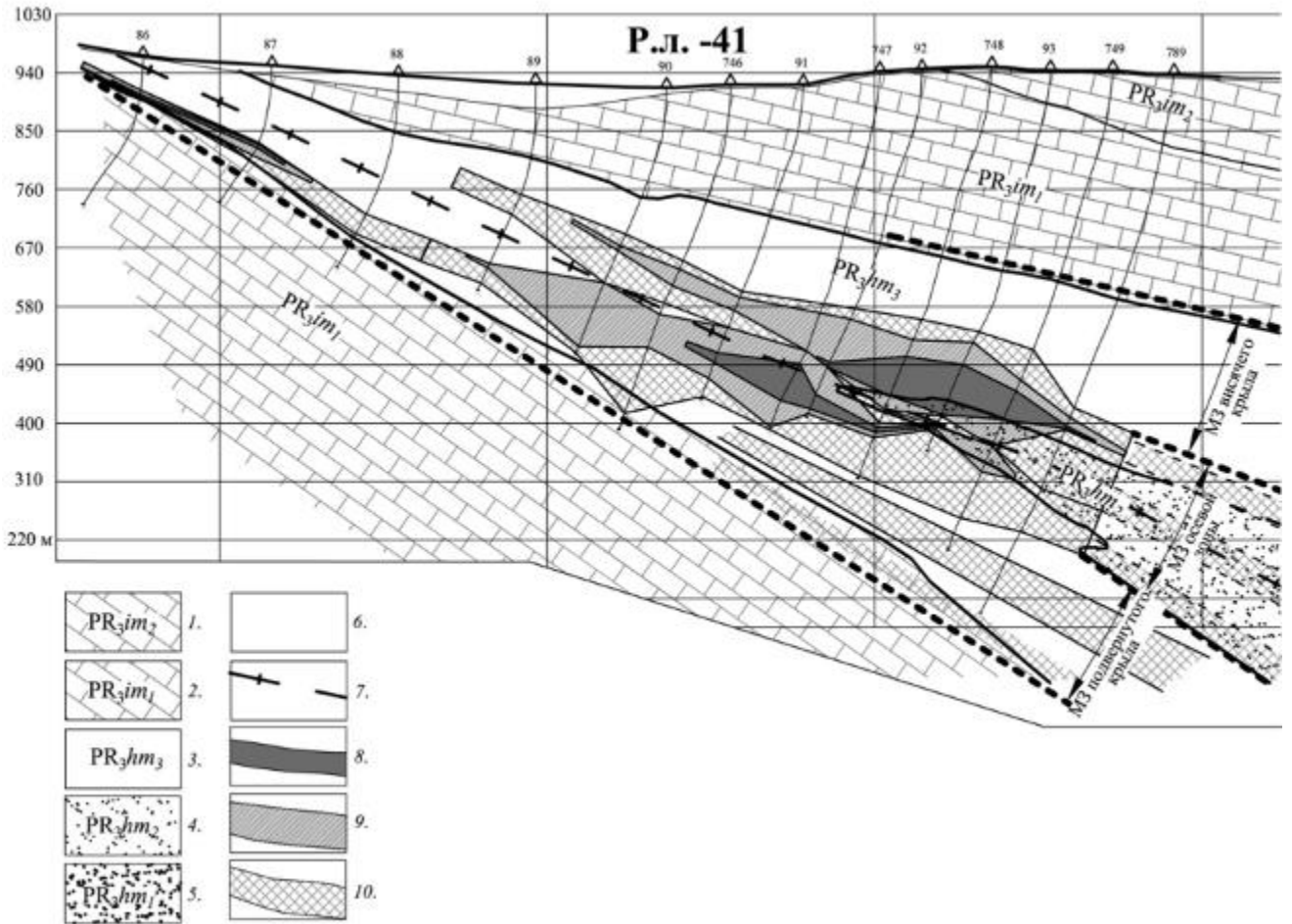
подобных месторождениях по сравнению с другими видами работ, в первую очередь горными и аналитическими. Однако нельзя не заметить, что на месторождения углеводородов геофизические методы используются на всех этапах: при поисках, оценке и разведке. Логично было бы перенять подходы промысловых геофизиков и в рудную геологию, так как из табл. 1 видно, что важнейшие в экономическом плане месторождения, например медные, золотые, свинцово цинковые по генезису схожи с месторождениями углеводородов, а значит, они имеют и сопоставимые условия локализации, и соответственно поисковые признаки.

Для подтверждения того, о чём сказано выше, приведём пример месторождения золота, которое аналогично по строению классическому месторождению углеводородов. Речь пойдет о крупнейшем месторождении золота России – Сухой Лог.

Рудная залежь месторождения приурочена к ядерной части опрокинутой антиклинальной складки (рис.1.6), сложенной обогащенными углистым веществом породами Хомолхинской свиты верхнего Протерозоя – микроанизотропными породами. Крылья антиклинальной складки сложены породами Имняхской свиты – однородными известняками [40].

Таким образом, можно сделать следующие выводы.:

1. Наличие структурного контроля месторождения – опрокинутая антиклинальная складка. Подобный структурный контроль характерен для месторождений углеводородов – классическая «структурная ловушка».



**Рис. 1.6.** Морфология и условия залегания рудных тел месторождения

### Сухой Лог

1. 1-2 имняхская свита: 1- верхняя подсвита, 2 - нижняя подсвита; 3-5 хомолхинская свита; 3 - верхняя подсвита, 4 - средняя подсвита, 5 - нижняя подсвита; 6 - Главная рудная зона (зона смятия); 7 - ось антиклинали; 8 - рядовые руды ("рудный столб, борт 1.5 г/т); 9 - бедные руды ("рудная зона", борт 0.5 г/т); 10 - убогие руды ("минерализованная зона", борт 0.2 г/т).

2. На месторождении Сухой Лог рудовмещающая толща (породы Имняхской свиты) отличается строением схожим со строением коллекторов углеводородов. Рассеянное углистое вещество в терригенных породах играет роль регионального геохимического барьера с восстановительной обстановкой, способствующей осаждению золота. При этом благоприятными условиями для локализации золотого оруденения являются интервалы разреза с горизонтами или пачками пород, различных по составу и содержанию углистого вещества (первичная анизотропия слоистых толщ и связанное с нею различие в

содержании углистого вещества). Особенности локализации золотого оруденения показывают, что главную роль в этом процессе играет не просто повышенное содержание углистого вещества в породах, а его перераспределение, выраженное в резкой дисперсии содержаний углистого вещества. На это указывает обычная приуроченность золота к контактам образований, контрастных по содержанию углистого вещества (вторичная анизотропия, связанная с наложенными деформациями в секущих разрывных структурах) и, следовательно, по физико-химическим свойствам. Очевидно, что в такой обстановке осаждающее действие углистого вещества, как активного восстановителя, проявляется в наибольшей степени. Возможно, этому способствует влияние естественного электрического поля, возникающего в природных условиях на границе сред, контрастных по содержанию электронно-проводящего углистого вещества.

3. Перекрывающая толща известняков Имняхской свиты может служить «покрышкой» для находящегося в «ловушке» золотого оруденения.

4. Исследователи до сих пор спорят о том, как золотое оруденение попало в сухоложскую антиклиналь. Одни предполагают, что повышенные содержания золота в породах Хомолхинской свиты возникли при формировании этой толщи в морском бассейне (углистые породы нужно рассматривать здесь как адсорбент), а в результате складкообразования. произошло перераспределение в сторону повышения концентраций золота. Другие полагают, что причиной образования золотого оруденения были гидротермальные растворы глубинного магматического очага, которые в условиях замкнутой системы сухоложской антиклинали осадили золото в анизотропных вмещающих породах. Таким образом, можно отметить, что формирование как некоторых залежей углеводородов, так и металлических полезных ископаемых приурочено к электрически анизотропным горным породам.

Известные ученые-геологи [51] не рассматривают подобную аналогию, однако они косвенно подтверждают приведенные выше выводы о том, что

горные породы, к которым приурочены некоторые рудные месторождения - электрически анизотропны. Для таких пород характерно следующее.

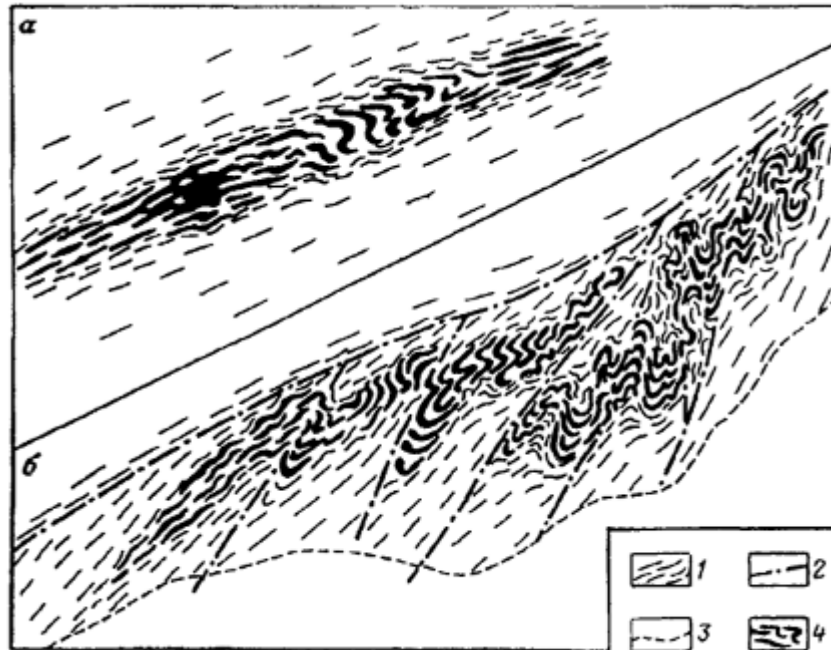
1) Проявление узла пересечения рудоконтролирующей зоны рассланцевания (возможно отражающей положение разлома фундамента) с шарниром опрокинутой сжатой антиклинали;

2) наличие в шарнире сжатой складки, сложенной углеродсодержащими филлитовидными сланцами, мощной зоны рассланцевания, унаследовавшей ее квиважированную осевую плоскость и вступившей «вместилищем» крупных скоплений руд;

3) контрастность геологической среды и благоприятное расположение толщи пластичных известняков (перекрывшей рудовмещающие сланцы), не подвергшейся трещиноватости и рудной минерализации, которая, таким образом, как бы экранировала и остановила «рост» зоны рассланцевания вверх по восстанию, а затем и распространение рудоносных растворов.

*Метаморфогенным* месторождениям присущи следующие особенности: пространственная и временная связь с метаморфическими образованиями, согласное с метаморфическими породами залегание рудных тел, особенности минерального состава руд и пород, текстуры и структуры руд свойственные метаморфическим породам (гнейсовая, сланцевая, гранобластовая и т.д.). Наиболее распространены месторождения, связанные с региональным метаморфизмом, потому что этот вид метаморфизма охватывает большие объемы земной коры: фундамент древних платформ и ядра срединных массивов – имеющих неоднородное блоковое строение. В изученных на данном этапе комплексах регионально-метаморфических пород выделяются ассоциации (зеленых сланцев, амфиболитовая, гранулитовая и т.д.), отражающие различные термодинамические условия метаморфизма. Так как каждой ассоциации отвечают свои виды месторождений полезных ископаемых, по этому можно судить об условиях благоприятных локализации того или иного месторождения. Таким образом, можно судить о наличии у некоторых

месторождений пространственной связи пород с анизотропным строением (со сланцевой текстурой например) и наличием полезного ископаемого (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Золото-кварцевые жилы в складках волочения месторождения Поркьюпайн в Канаде [68].

1 – сланцеватость, 2 – разрывы, 3 – границы минерализованное зоны, 4 – рудные жилы, а – в кливажных зонах, б – в зонах приразломного смятия.

В главе 2 данной работы будет показано, что можно определить коэффициент анизотропии  $\lambda$  анизотропных пластов, если изучаемый пласт пройден скважиной под острым углом к оси анизотропии. Во многих практически значимых случаях, при геофизических исследованиях пройденных скважиной анизотропных пород угол  $\alpha$  может отличаться от нуля.

При геофизических исследованиях в вертикальных скважинах на стадиях поисков и разведки месторождений нефти или газа в терригенных горных породах с субгоризонтальным залеганием пластов и прослоев, типичной является ситуация, когда ось скважины - почти ортогональна границам этих пластов или прослоев. В этом случае (при тонкослоистом строении пластов) направление оси анизотропии  $n$  в пластах близко к направлению оси вертикальной скважины (и ориентированных по направлению оси скважины каротажных зондов). В этой работе угол между направлением оси анизотропии

$n$  горных пород (или их модели) и осью скважины (либо - направлением, по которому ориентирован каротажный зонд) обозначим  $\alpha$ .

В том случае, когда вертикальная скважина пересекает пласты с субгоризонтальными границами пластов и прослоев, величина угла  $\alpha$  – близка к нулю. Но возможны и иные ситуации. В последнее время в мировой и отечественной практике разведки и эксплуатации месторождений углеводородов нашли применение наклонные и горизонтальные скважины. Обратим внимание на участок, на котором осуществляют постепенный переход угла бурения скважины от вертикального к горизонтальному, именно в этом случае возникает возможность определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по приведенным в главе 2 зависимостям. Будем иметь в виду, что случаи наклонного пересечения горизонтальных пластов скважиной, если они возникнут в ходе исследования коллекторов углеводородов по любым другим причинам, могут быть изучены новым зондом.

Иначе со скважинами, пробуренными при поисках месторождений твердых полезных ископаемых. Такие месторождения, как правило, имеют наклонное залегание. Скважины для их поисков, оценки и разведки задают вертикальными или наклонными, с тем, чтобы пересечь искомые наклонные рудные тела (по возможности) под углами, близкими к  $90^\circ$ , хотя существующие методические документы в рудной геологии лимитируют углы пересечения скважины и рудного тела только когда последние составляют  $30^\circ$  и менее. Отчасти из-за этого, и по другим причинам (технические возможности буровых станков, заранее неизвестные или изменяющиеся в широких пределах углы залегания рудных тел и т.д.) в рудной геологии скважины пересекают рудные тела под острым углом к их границам и к их оси анизотропии  $n$ , если такие тела - анизотропны. Поэтому можно сделать вывод о том, что условия при геофизических исследованиях скважин в рудной геологии (а в некоторых случаях – и в промысловой геологии) могут отвечать тем моделям пройденного скважиной анизотропного пласта, для которых были получены приведенные в



этой работе результаты физического моделирования и обоснована методика определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$ .

### **Выводы**

1. Определение электрических параметров анизотропных горных пород (коэффициент анизотропии  $\lambda$ , поперечное удельное электрическое сопротивление  $\rho_n$ ) является сложной и практически важной задачей.

2. На месторождениях углеводородов электрическая анизотропия присуща тонкослоистым и сложнопостроенным коллекторам, которые, в условиях истощения коллекторов относительно простого строения, приобретают всё большую промышленную значимость.

3. Электрическая анизотропия горных пород является условием, благоприятным для локализации месторождений некоторых видов металлических полезных ископаемых, в частности золота, меди, свинца, цинка и др.

## ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В МОДЕЛЯХ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

При проведении физического моделирования проводилось сравнение их результатов с данными математического моделирования. Эти данные были получены моим научным руководителем, доктором физико-математических наук А. Д. Каринским. Он также оказал значительную помощь при написании этой главы диссертационной работы, посвящённой теоретическому обоснованию применения нового зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  горных пород.

### 2.1. Электрическое поле магнитного диполя в однородной анизотропной среде

В общем случае электрическое поле  $\mathbf{E}$  – это сумма кулонового ( $\mathbf{E}^{\text{Ку.л}}$ ) и индукционного ( $\mathbf{E}^{\text{ЭМН}}$ ) полей. Источниками гальванической (кулоновой) составляющей поля  $\mathbf{E}$  являются электрические заряды. В изотропных средах такие (индуцированные) заряды могут существовать в местах нарушения однородности среды. Но в анизотропной среде электрические заряды могут присутствовать даже в том случае, когда такая среда - однородна. Если в такой среде ось  $Z$  декартовых или цилиндрических координат ориентирована по оси анизотропии  $n$ , то, как показано в монографии [103], объёмную плотность  $\delta$  индуцированных зарядов определяет выражение:  $\delta = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \frac{\partial E_z}{\partial z}$ , где  $\varepsilon_0 \approx 10^{-9}/(36\pi)$ , Ф/м – электрическая постоянная. Согласно этому выражению,  $\delta \neq 0$ , если  $\lambda \neq 1$  (анизотропная среда) и компонента поля  $\mathbf{E}$  по оси анизотропии меняется по направлению этой оси.

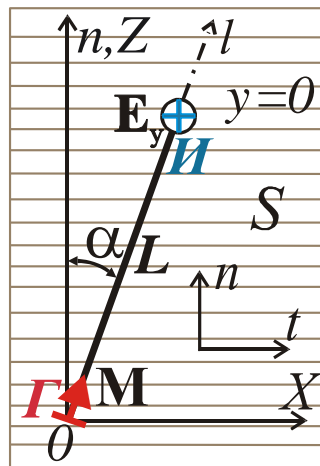
Будем далее полагать, что заданным (сторонним) возбудителем гармонически меняющегося электромагнитного поля является расположенный

в немагнитной однородной одноосно-анизотропной среде (с электрическими параметрами  $\rho_n$ ,  $\rho_t$  и  $\lambda$ ) "генераторный" магнитный диполь  $\Gamma$  с моментом  $\mathbf{M}$ . Введем декартову систему координат  $x, y, z$  с началом  $O$  в центре магнитного диполя и осью  $Z$  по оси анизотропии. Скалярные декартовы компоненты момента  $\mathbf{M}$  магнитного диполя обозначим  $M_x, M_y, M_z$ . Оси  $X$  и  $Y$  направим так, чтобы момент  $\mathbf{M}$  магнитного диполя лежал в плоскости  $y=0$ . Тогда компонента  $M_y=0$ .

В работе [38] показано, что при указанных выше условиях объёмную плотность  $\delta$  индуцированных электрических зарядов определяет следующее

$$\text{выражение: } \delta = \frac{i\omega\mu_0\varepsilon_0 M_x}{4\pi} \lambda(\lambda^2 - 1) yz \frac{\exp(ik_n \tilde{R})}{\tilde{R}^5} \times (-3 + 3ik_n \tilde{R} + k_n^2 \tilde{R}^2), \text{ где } i = \sqrt{-1}$$

- мнимая единица,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $f$  - частота,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , Гн/м - магнитная постоянная,  $\tilde{R} = \sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2}$ , а (в случае квазистационарного поля) поперечное волновое число  $k_n = \sqrt{i\omega\mu_0 / \rho_n}$ . Из выражения для  $\delta$  следует, что скалярное поле  $\delta$  имеет нечётную симметрию относительно плоскости  $y=0$



**Рис. 2.1.** Взаимная ориентация зонда и оси анизотропии  $n$ .

(плоскости  $S$  рисунка 2.1). Поэтому в плоскости  $S$  создаваемая зарядами кулонова составляющая  $\mathbf{E}^{\text{Кул}}$  поля  $\mathbf{E} = \mathbf{1}_y E_y$ .

В ближней зоне магнитного диполя  $\Gamma$ , при выполнении неравенства  $|k_n|\tilde{R} \ll 1$ , выражение для  $\delta$  можно упростить:  $\delta = \frac{i\omega\mu_0\varepsilon_0 M_x}{4\pi} 3\lambda(1-\lambda^2) \frac{yz}{\tilde{R}^5}$ . То есть, при возбуждении ЭМ поля переменным магнитным диполем и  $|k_n|\tilde{R} \ll 1$  плотность  $\delta$  индуцированных зарядов, а, следовательно, и их электрическое поле  $\mathbf{E}^{\text{Кул}}$ , зависит лишь от одного электрического параметра среды – коэффициента анизотропии  $\lambda$ .

В работе [38] показано также, что декартовы компоненты электрического поля в плоскости  $y=0$  определяют следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} E_x = E_z = 0, \quad E_y = E_{xy} + E_{zy}, \quad E_{zy} = \frac{i\omega\mu_0 M_z}{4\pi} x \frac{\exp(ik_t R)}{R^3} (1 - ik_t R), \\ E_{xy} = \frac{-i\omega\mu_0 M_x}{4\pi} z \left[ \frac{\exp(ik_t R)}{R^3} (1 - ik_t R) + \Theta \right], \\ \Theta = \frac{1}{x^2} \left[ \frac{\exp(ik_t R)}{R^3} - \lambda \frac{\exp(ik_n \tilde{R})}{\tilde{R}^3} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

При  $x \rightarrow 0$  и  $z \neq 0$   $\Theta \approx \frac{-i\omega\mu_0 M_x}{8\pi} \frac{z}{|z|^3} \left( 1 + \frac{1}{\lambda^2} \right) \exp(ik_t |z|) (1 - ik_t |z|).$

В (2.1)  $R = \sqrt{x^2 + z^2}$ ,  $\tilde{R} = \sqrt{x^2 + \lambda^2 z^2}$ .

Пусть теперь лежащая на оси  $l$  магнитного диполя точка наблюдения  $I$  (см. рис. 2.1) находится на расстоянии  $L$  (длина зонда) от центра генераторного магнитного диполя  $\Gamma$ . Ось  $l$  магнитного диполя условно назовём осью зонда. Угол между осью анизотропии  $n$  и осью  $l$  обозначим  $\alpha$ . Если точка наблюдения  $I$  расположена в ближней зоне магнитного диполя  $\Gamma$ , то справедливы выражения:

$$|k_{n,t}|L \ll 1, \quad \text{где} \quad |k_{n,t}| = \sqrt{(\omega\mu_0)/\rho_{n,t}}. \quad (2.2)$$

Отметим, что, так как  $\rho_t \leq \rho_n$ , имеем  $|k_t| \geq |k_n|$ . Поэтому в (2.2) неравенство  $|k_{n,t}|L \ll 1$  можем заменить неравенством  $|k_t|L \ll 1$ .

При выполнении неравенства (2.2) и  $0 < \alpha \leq 90^\circ$  выражения (2.1) для компоненты  $E_y$  можно упростить. Полагая в (2.1):  $M_x = M \cdot \sin\alpha$ ,  $M_z = M \cdot \cos\alpha$ ,  $R = L$ ,  $x = L \cdot \sin\alpha$ ,  $z = L \cdot \cos\alpha$  при условии (2.2) после преобразований получаем

следующие простые выражения для компоненты  $E_y$  в точке  $I$ :  
 $E_y(I) = \text{Re}E_y(I) + i\text{Im}E_y(I)$ ,

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}E_y(I) &= \frac{M}{4\pi} \text{ctg}\alpha \frac{\omega^2 \mu_0^2}{2\rho_t} \left( \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}}{\lambda} - 1 \right), \\ \text{Im}E_y(I) &= \frac{M}{4\pi} \text{ctg}\alpha \frac{\omega \mu_0}{L^2} \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

В (2.3)  $\text{Re}E_y$ ,  $\text{Im}E_y$  - составляющие  $E_y$ , первая из которых (реактивная компонента) меняется со временем синхронно с изменением момента  $\mathbf{M}$ , а вторая (активная компонента) запаздывает относительно  $\mathbf{M}$  по фазе на  $\pi/2$ .

Из выражений (2.3) следует, что при выполнении условия (2.2) и заданных величинах  $M$  и  $\omega$  компонента  $\text{Re}E_y(I)$  зависит от коэффициента анизотропии  $\lambda$ , угла  $\alpha$  и от продольного удельного электрического сопротивления  $\rho_t$ . Компонента  $\text{Im}E_y(I)$  при заданных значениях  $L$ ,  $M$  и  $\omega = 2\pi f$  зависит только от коэффициента  $\lambda$  и угла  $\alpha$ .

То, что в ближней зоне компонента  $\text{Im}E_y$  на оси магнитного диполя не зависит от параметров  $\rho_t$ ,  $\rho_n$  однородной анизотропной среды, но зависит от коэффициента анизотропии  $\lambda$ , можно объяснить следующим образом. Замкнутый сторонний электрический ток  $I$  (магнитный диполь) в соответствии с законом Био-Савара возбуждает не зависящее от электрических параметров среды и меняющееся синхронно с током  $I$  переменное магнитное поле, которое (в индуктивных методах электроразведки и в индукционном каротаже) называют первичным магнитным полем  $\mathbf{H}^n$ . Гармонически меняющееся поле  $\mathbf{H}^n$  по закону электромагнитной индукции возбуждает «первичное» вихревое электрическое поле  $\mathbf{E}^n$ , компоненты которого запаздывают по фазе относительно  $I$  на  $\pi/2$ . На оси  $l$  магнитного диполя имеющее индукционную природу поле  $\mathbf{E}^n = 0$ . Поле  $\mathbf{E}^n$  не зависит от удельных электрических сопротивлений  $\rho$  среды. От  $\rho$  зависит плотность  $\mathbf{j}$  электрических токов в проводящей среде, создаваемых полем  $\mathbf{E}^n$ , а также вторичное магнитное поле  $\mathbf{H}^b$  этих токов (см., например, монографию [49] и др.). В анизотропной среде, в

соответствии с приведенными выше выражениями для плотности  $\delta$  объёмных зарядов, в присутствии поля  $\mathbf{E}^n$  существуют электрические заряды. То есть в ближней зоне поле  $\mathbf{ImE}$  (компоненты которого запаздывают относительно тока  $I$  по фазе на  $\pi/2$ ) - это сумма не зависящего от параметров среды первичного электрического поля  $\mathbf{E}^n$  и кулонова поля индуцированных в анизотропной среде зарядов с зависящей от  $\lambda$  плотностью  $\delta$ . На оси  $l$  магнитного диполя  $\mathbf{E}^n=0$ .

Обратим ещё внимание на следующее. Согласно (2.3), компонента  $\text{Im}E_y$  на оси магнитного диполя пропорциональна частоте  $f=\omega/2\pi$ . То есть при измерении этой компоненты (при условии, когда электромагнитные помехи оказывают влияние на результаты измерений) с ростом частоты увеличивается "полезный сигнал". Но при выборе оптимальной частоты  $f$  (при проведении измерений) надо ещё принять во внимание, что выражения (2.3) справедливы при выполнении неравенства  $|k_t|L \ll 1$ , а величина  $|k_t|$  растёт с увеличением частоты  $f$ .

В работе [38] было показано следующее. При анализе выражений (2.3) установлено, что при выполнении неравенства (2.2) на оси  $l$  магнитного диполя (в точке  $I$ , см. рис. 2.1) отношение амплитуд составляющих  $\text{Re}E_y$  и  $\text{Im}E_y$ :

$$\frac{|\text{Re} E_y|}{|\text{Im} E_y|} = \frac{|k_t^2|L^2}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} + \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \cos(2\alpha)}, \quad (2.4)$$

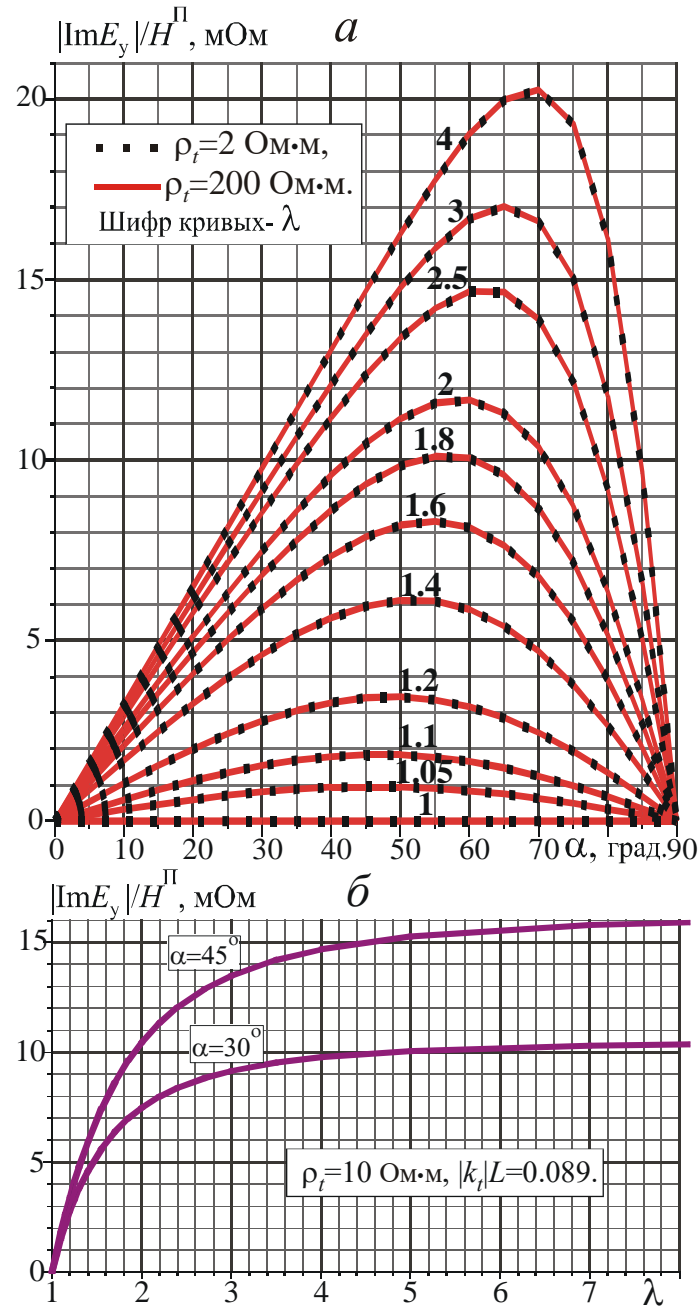
где волновое число  $k_t = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho_t}$ .

Согласно равенствам (2.2), (2.3), (2.4) в ближней зоне, при  $|k_t|L \ll 1$ , амплитуда составляющей  $\text{Im}E_y$ :  $|\text{Im}E_y| \gg |\text{Re}E_y|$  и, следовательно, для амплитуды  $|E_y|$  компоненты  $E_y$  на оси  $l$  получаем:

$$\text{при } |k_t|L \ll 1: |E_y| = \sqrt{(\text{Re} E_y)^2 + (\text{Im} E_y)^2} \approx |\text{Im} E_y|. \quad (2.5)$$

То, что в ближней зоне амплитуда составляющей  $\text{Im}E_y(I)$  (для определения которой нужны измерения фазы) близка к амплитуде компоненты  $E_y(I)$ , позволило упростить методику измерений при физическом моделировании (см. главы 3, 4).

В соответствии с (2.3) в ближней зоне составляющая  $\text{Im}E_y$  в точке  $I$  на оси магнитного диполя зависит лишь от одного электрического параметра среды - коэффициента анизотропии  $\lambda$ . Этим можно воспользоваться для определения параметра  $\lambda$  при известной величине  $\text{Im}E_y$ .



**Рис. 2.2.** Пример номограммы для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значениям  $|\text{Im}E_y|$  и  $\alpha$  (а); зависимости  $|\text{Im}E_y|$  от  $\lambda$  при двух значениях угла  $\alpha$  (б).

$$f=10 \text{ кГц}, L=1\text{м}$$

На рис. 2.3,*a* показана номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по величине  $|\text{Im}E_y| \approx |E_y|$  и углу  $\alpha$ . Расчёты проведены на основе выражений (2.1) для компоненты  $E_y$ , а не приближённых равенств (2.3). Значения  $|\text{Im}E_y|$  на этой номограмме нормированы на первичное магнитное поле  $H^{\text{П}}$  в точке *И*. На оси  $l$  магнитного диполя в точке *И*  $H^{\text{П}} = M / (2\pi L^3)$ .

Зависимости  $|\text{Im}E_y| / H^{\text{П}}$  от  $\alpha$ , приведенные для двух значений параметра  $\rho_t$  (2 Ом·м и 200 Ом·м), практически совпадают. Это обусловлено следующим. При указанных на рис. 2.3 величинах  $f$ ,  $L$  имеем  $|k_t|L \approx 0.2 \ll 1$  при  $\rho_t = 2$  Ом·м и  $|k_t|L \approx 0.02 \ll 1$  при  $\rho_t = 200$  Ом·м, то есть точка *И* находится в ближней зоне генераторного магнитного диполя. В этом случае, согласно (2.3), (2.5), значения  $|\text{Im}E_y|$ , а также и  $|E_y| \approx |\text{Im}E_y|$  не зависят от параметров  $\rho_t$ ,  $\rho_n$ .

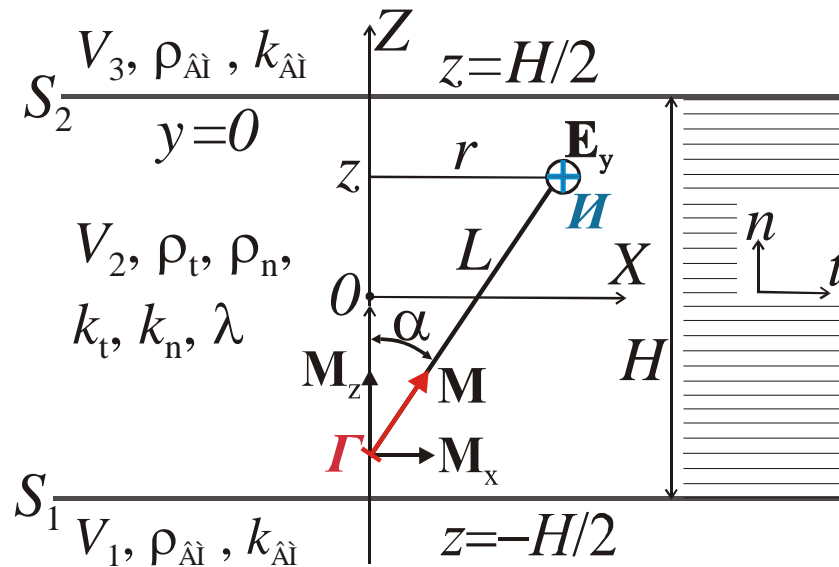
На рис. 2.2,*a* видно, что при  $\alpha = 0^\circ$  и при  $\alpha = 90^\circ$  компонента  $\text{Im}E_y = 0$ . Судя по представленным на рис. 2.2,*a* результатам расчётов, благоприятным условием для определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  в точке *И* являются то, когда значения угла  $\alpha \geq 10^\circ - 15^\circ$  и  $\alpha \leq 82^\circ - 85^\circ$ .

На рис. 2.2,*б* приведены зависимости  $|\text{Im}E_y| / H^{\text{П}}$  от коэффициента анизотропии  $\lambda$  при двух значениях угла  $\alpha$ . Важно отметить, что при характерных для большинства анизотропных горных пород невысоких значениях коэффициента анизотропии ( $\lambda < 2-3$ ) величина  $|\text{Im}E_y|$  имеет относительно высокую "чувствительность" к изменению  $\lambda$ . При не характерных для горных пород, аномально высоких значениях  $\lambda$  величина  $|\text{Im}E_y|$  лишь незначительно меняется с изменением  $\lambda$ . Результаты расчётов показали, в частности, что при фиксированных значениях  $M$ ,  $L$ ,  $\alpha$  и изменении  $\lambda$  от 10–20 до 1000 величины  $|\text{Im}E_y|$  и  $|E_y|$  практически не меняются. Это надо будет принять во внимание при рассмотрении результатов физических экспериментов для модели пласта с очень высоким значением  $\lambda$ .

## 2.2. Электрическое поле переменного магнитного диполя в присутствии анизотропного пласта в изотропной вмещающей среде



Для теоретического изучения вопроса о том, какое влияние оказывают границы пластов на компоненту  $E_y$  на оси переменного магнитного диполя, моим научным руководителем, А. Д. Каринским было получено решение



**Рис. 2.3.** Модель анизотропного пласта конечной мощности и зонда электромагнитного каротажа для определения величины  $|E_y|$  на оси переменного магнитного диполя с моментом  $\mathbf{M}$

прямой задачи электродинамики о поле переменного магнитного диполя с произвольно ориентированным моментом  $\mathbf{M}$  для следующей модели среды. Две горизонтальные плоскости  $S_1$ ,  $S_2$  делят пространство на три области:  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$ . Изотропные полупространства  $V_1$  и  $V_3$  с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_{\text{вм}}$  вмещают занимающий область  $V_2$  анизотропный пласт (плоско - параллельный слой) с вертикальной осью анизотропии  $n$  и с мощностью  $H$ . Электрические параметры пласта:  $\rho_t$ ,  $\rho_n$  и  $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t}$  (рис. 2.1).

В полученном решении прямой задачи, приведенном в диссертационной работе А. Д. Каринского [31], выражения для компонент ЭМ поля – это несобственные интегралы в смысле главного значения. Подынтегральные функции содержат функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядка, а также экспоненты. При расчётах несобственных интегралов со

знакопеременными подынтегральными функциями были применено преобразование Эйлера [22].

На основе решения прямой задачи были разработаны алгоритмы расчёта, составлены программы для компьютера и проведено математическое моделирование.

В работах [33; 53; 56] представлены результаты расчётов, полученные на основе решения прямой задачи электродинамики для модели, показанной на рис. 2.3. Примеры результатов математического моделирования приведены на рис. 2.4, 2.5.

На рис. 2.4 показаны зависимости величины  $|E_y|$ , нормированной на первичное магнитное поле  $H^{\Pi}$  от "вертикальной" координаты  $z$  относительно середины пластов с мощностью 2 м и 4 м, с одинаковым коэффициентом

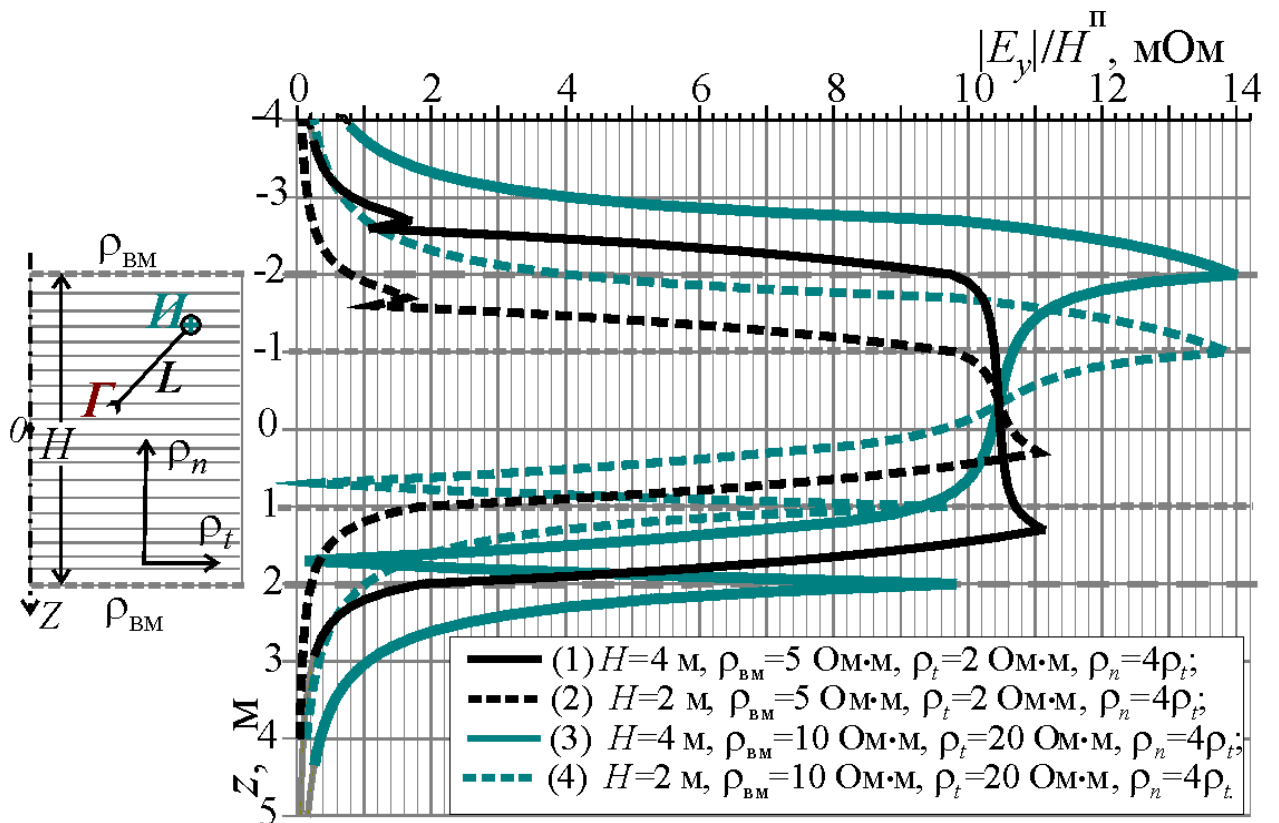


Рис. 2.4. Примеры расчётных кривых  $|E_y|/H^{\Pi}$  против анизотропных пластов.

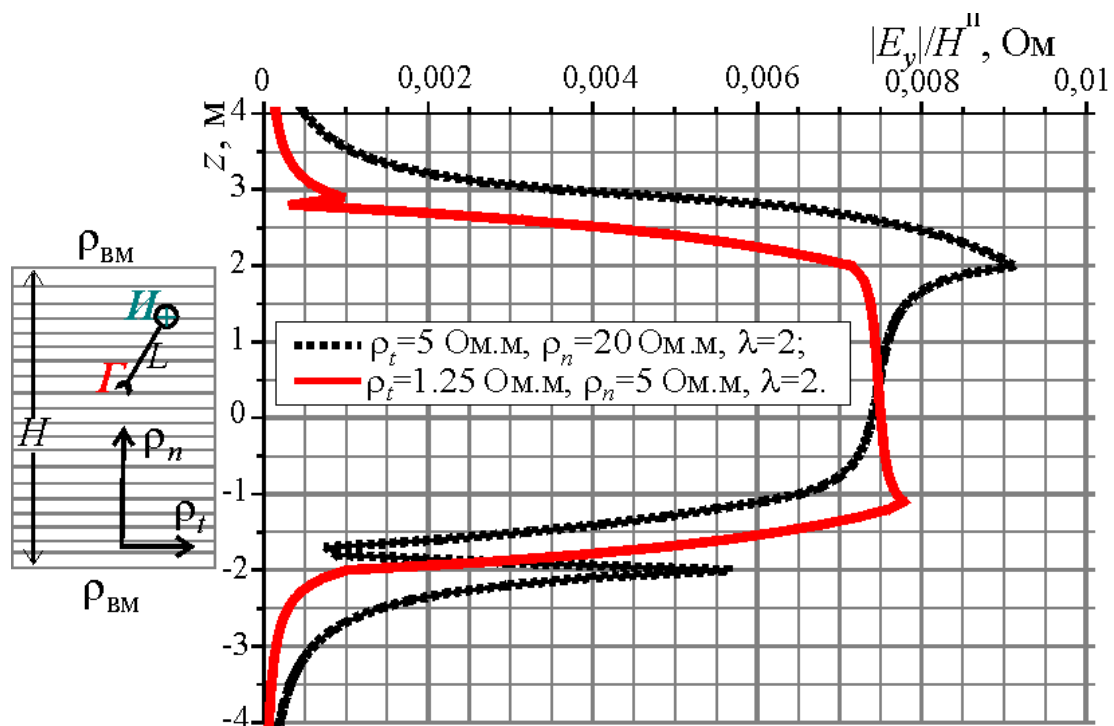
$$L=1 \text{ м, } f=10 \text{ кГц, } \alpha=45^\circ$$

анизотропии  $\lambda=2$ , но разными значениями параметров  $\rho_t$  и  $\rho_n$  при угле  $\alpha=45^\circ$ . На оси магнитного диполя  $H^{\Pi}=M/(2\pi L^3)$  [49]. За "точку записи" зонда принята

точка *И*. На рисунке видно, что вблизи границ пласта кривые  $|E_y|$  могут быть осложнены экстремумами. Причиной этого, конечно, является влияние электрического поля поверхностных зарядов, индуцированных на границах.

В работе [32] показано, от чего зависит поверхностная плотность  $\Sigma$  зарядов, на границе анизотропной и изотропной сред. При прочих одинаковых условиях для описанной выше (рис. 2.3) модели анизотропного пласта на его границах  $S_1, S_2$  величина  $|\Sigma|$  тем выше, чем больше (по абсолютной величине) коэффициент контрастности  $(\rho_n - \rho_{\text{вм}})/(\rho_n + \rho_{\text{вм}})$ . Поэтому на рис. 2.4 при  $\rho_n = 80$  Ом·м,  $\rho_{\text{вм}} = 10$  Ом·м кривые  $|E_y|/H^\Pi$  имеет более сложную конфигурацию вблизи границ пласта, чем при  $\rho_n = 8$  Ом·м,  $\rho_{\text{вм}} = 5$  Ом·м.

Отметим ещё следующее. Мощность  $H$  моделей пластов на рис. 2.4 превышает длину зонда  $L$ . В этих случаях по участку кривой  $|E_y|/H^\Pi$  против средней части пласта можно уверенно определить такое значение  $|E_y|/H^\Pi$ , которое практически не зависит от влияния ограниченной мощности пласта. При выполнении этого условия и известном угле  $\alpha$  для определения



**Рис. 2.5.** Примеры расчётных кривых  $|E_y|/H^\Pi$  против анизотропных пластов.

$$L=1 \text{ м}, f=10 \text{ кГц}, H=4 \text{ м}, \rho_{\text{вм}}=3 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \alpha=30^\circ$$

коэффициента анизотропии  $\lambda$  пласта можно воспользоваться полученной для модели однородной анизотропной среды номограммой, пример которой приведен на рис. 2.2,*a*. Действительно, на кривых (1), (2), (3) на рис. 2.4 при  $\lambda=2$ , но при разных значениях  $\rho_t$  и  $\rho_n$ , против средней части пластов значение  $|E_y|/H^{\Pi} \approx 10.5$  мОм. При этом значении  $|E_y|/H^{\Pi}$  и при  $\alpha=45^\circ$  по приведенной на рис. 2.2,*a* номограмме (принимая во внимание условие (2.5)), определяем:  $\lambda \approx 2$ , что совпадает с величиной этого параметра у моделей пластов на рис. 2.4.

На рис. 2.5 приведен ещё один пример расчёта кривых  $|E_y|/H^{\Pi}$  против показанной на рис. 2.3 модели анизотропного пласта при возбуждении первичного электромагнитного поля переменным магнитным диполем при угле  $\alpha=30^\circ$ . Показаны две зависимости  $|E_y|/H^{\Pi}$  от "вертикальной" координаты  $z$  относительно середины пластов одинаковой мощности  $H$  и с одинаковым коэффициентом анизотропии  $\lambda$ , но разными значениями параметров  $\rho_t$  и  $\rho_n$ . При  $\rho_{\text{вм}}=3$  Ом·м и  $\rho_n=20$  Ом·м, кривая имеет более сложную конфигурацию вблизи границ пласта, чем при  $\rho_{\text{вм}}=3$  Ом·м и  $\rho_n=5$  Ом·м. О том, с чем это связано, было сказано выше.

### **2.3. Оценка требований к допустимой погрешности измерений для зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента анизотропии $\lambda$**

В этом разделе приведём выражения и результаты численных расчетов для обоснования того, как влияют погрешности измерения величины  $|E_y|$  при помощи рассматриваемого в этой работе зонда электромагнитного каротажа и ошибки определения угла  $\alpha$  на ту погрешность, с которой мы можем определить коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$ . Сделаем это для случая, когда модель анизотропной среды - однородна, угол  $\alpha \neq 0$ , а точка наблюдения  $I$  расположена в ближней зоне генераторного магнитного диполя  $G$  на оси диполя. В этом случае, в соответствии с (2.3), (2.5), величину  $|E_y|$  в точке  $I$  определяет следующее выражение:

$$|E_y|(H) = \frac{M \cdot f \cdot \mu_0}{2L^2} \left[ \operatorname{ctg} \alpha \cdot \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}} - 1 \right) \right]. \quad (2.6)$$

Зависимость  $|E_y|$  от коэффициента анизотропии  $\lambda$  определяет множитель в круглых скобках в правой части равенства (2.6). Производная  $\frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}} - 1 \right) = \frac{\sqrt{2}(1 - \cos 2\alpha)}{[\lambda^2(1 + \cos 2\alpha) + (1 - \cos 2\alpha)]^{3/2}}$ . Отсюда, согласно (2.6), следует, что производная

$$F_{E\lambda} = \frac{\partial |E_y|}{\partial \lambda} = \frac{M \cdot f \cdot \mu_0}{2L^2} \operatorname{ctg} \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}(1 - \cos 2\alpha)}{[\lambda^2(1 + \cos 2\alpha) + (1 - \cos 2\alpha)]^{3/2}}. \quad (2.7).$$

При малых абсолютных изменениях  $\Delta\lambda$  коэффициента анизотропии  $\lambda$  и соответствующих изменениях  $\Delta|E_y|$  величины  $|E_y|$  отношение  $\frac{\Delta|E_y|}{\Delta\lambda} \approx \frac{\partial |E_y|}{\partial \lambda} = F_{E\lambda}$ .

Пользуясь этим, перейдём от равенства для производной  $\partial|E_y|/\partial\lambda$  к приближённым выражениям, определяющим влияние  $\Delta|E_y|$  на  $\Delta\lambda$ :

$\Delta\lambda \approx \frac{\Delta|E_y|}{\partial|E_y|/\partial\lambda} = \frac{\Delta|E_y|}{F_{E\lambda}}$ . Если относительная погрешность измерения величины

$|E_y|$  равна  $\delta|E_y| = \frac{\Delta|E_y|}{|E_y|}$ , то  $\Delta|E_y| = |E_y| \cdot \delta|E_y|$ . Отсюда следует, что при

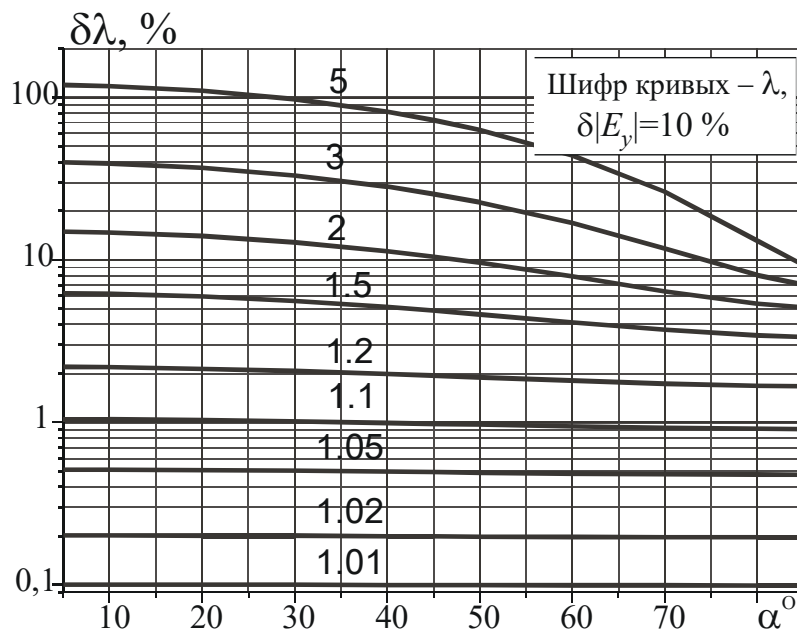
относительной погрешности  $\delta|E_y|$  измерения величины  $|E_y|$  абсолютную ( $\Delta\lambda$ ) и относительную ( $\delta\lambda$ ) погрешности определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  определяют следующие выражения:

$$\Delta\lambda \approx \frac{|E_y|}{\partial|E_y|/\partial\lambda} \cdot \delta|E_y|, \quad \delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (2.8)$$

Отметим ещё следующее. Так как в выражении (2.8) для  $\Delta\lambda$  числитель  $|E_y|$  и знаменатель  $\partial|E_y|/\partial\lambda$  дроби содержат множитель  $\frac{M \cdot f \cdot \mu_0}{2L^2}$ , то величины  $\Delta\lambda$  и  $\delta\lambda$  не зависят от частоты  $f$  и длины зонда  $L$ . Для правомерности выражения (2.8) требуется лишь то, чтобы было справедливо неравенство  $|k_t|L \ll 1$ , а изменения

$\Delta\lambda$  и  $\Delta|E_y|$  были достаточно малыми для того, чтобы отношение  $\frac{\Delta|E_y|}{\Delta\lambda}$  при изменении  $\Delta\lambda$  коэффициента  $\lambda$  и соответствующее этому изменению  $\Delta|E_y|$  величины  $|E_y|$  было близко к производной  $\partial|E_y|/\partial\lambda$ .

На рис. 2.6. показаны результаты расчётов, полученные на основе приведенных выше выражений (2.6), (2.7), (2.8). Как видно на этом рисунке,



**Рис. 2.6.** Зависимости относительной погрешности  $\delta\lambda$  (%) определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  от угла  $\alpha$ .

Относительная погрешность определения величины  $|E_y|$  -  $\delta|E_y|=10\%$

при изменении угла  $\alpha$  в пределах от  $5^\circ$  до  $85^\circ$  и ненамного превышающих единицу значениях коэффициента анизотропии  $\lambda$  величина угла  $\alpha$  не оказывает значительного влияния на зависимость погрешности  $\delta\lambda$  от относительной ошибки  $\delta|E_y|$  измерения величины  $|E_y|$ . Лишь при аномально - высоких (для анизотропных горных пород) значениях  $\lambda$  (в первые единицы и более) величина  $\delta\lambda$  значительно уменьшается с увеличением угла  $\alpha$ .

Вместе с тем, как видно на рис. 2.6, при пределах изменения коэффициента анизотропии  $2 \leq \lambda \leq 5$  и при относительной погрешности измерений  $\delta|E_y|=10\%$  значения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по измеренной

величине  $|E_y|$  могут быть определены с большой погрешностью  $\delta\lambda$  - приблизительно от 10% до 100%. В последнем случае по результатам измерения величины  $|E_y|$  можно вычислить значение коэффициента  $\lambda$  с очень большой погрешностью, но, при этом, можно определить, что этот коэффициент имеет аномально - высокие значения. Последнее также может быть очень значимым для практики результатом.

Отметим ещё следующее. Величина  $\delta|E_y|=10\%$ , принятая при проведении расчётов, результаты которых представлены на рис. 2.6, была выбрана на основе сравнения результатов "основных" и "повторных" измерений при физическом моделировании со сконструированным прототипом зонда *ИО.095Г* электромагнитного каротажа. Конечно, погрешность  $\delta|E_y|$  для имеющих аналогичную конструкцию, но созданных на основе современных технологических разработок, габаритных макетов зондов, предназначенных для определения коэффициента  $\lambda$  пройденных скважиной горных пород, может быть значительно меньше 10-и процентов. В этом случае соответственно будут меньше и погрешности  $\delta\lambda$  по сравнению с теми, которые показаны на рис. 2.6.

Рассмотрим теперь то, какое влияние оказывает ошибка определения угла  $\alpha$  на погрешность определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  на оси переменного магнитного диполя. При комплексных геофизических исследованиях скважин угол  $\alpha$  можно определить по данным наклонометрии и инклинометрии. Судя по характеристикам применяемых для этих целей в настоящее время зондов [109] [63], угол  $\alpha$  может быть определён с погрешностью не более  $1^\circ - 2^\circ$ .

Обратимся к выражению (2.6). Зависимость  $|E_y|$  от угла  $\alpha$  между "осью"  $l$  зонда и осью анизотропии  $n$  определяет множитель в квадратных скобках в правой части равенства (2.6). Из этого равенства получаем:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ \operatorname{ctg} \alpha \cdot \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}} - 1 \right) \right] =$$

$$= \frac{-\sqrt{2}}{4} \cdot \left\{ \frac{\lambda(5+3\lambda^2) + 4\lambda(\lambda^2-1)\cos(2\alpha) + \lambda(\lambda^2-1)\cos(4\alpha) -}{\sin^2 \alpha [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{-2\sqrt{2} [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}}{\sin^2 \alpha [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}} \right\}.$$

Отсюда следует, что производная

$$\frac{\partial |E_y|}{\partial \alpha} = \frac{M \cdot f \cdot \mu_0}{2L^2} \cdot \frac{-\sqrt{2}}{4} \cdot \left\{ \frac{\lambda(5+3\lambda^2) + 4\lambda(\lambda^2-1)\cos(2\alpha) + \lambda(\lambda^2-1)\cos(4\alpha) -}{\sin^2 \alpha [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{-2\sqrt{2} [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}}{\sin^2 \alpha [(\lambda^2+1) + (\lambda^2-1)\cos(2\alpha)]^{3/2}} \right\}. \quad (2.9)$$

Обозначим  $\frac{\partial |E_y|}{\partial \alpha} = F_{E\alpha}$ . При достаточно малой ошибке  $\Delta\alpha$  определения

угла  $\alpha$  её влияние на абсолютную погрешность определения  $\Delta\lambda$  коэффициента

анизотропии  $\lambda$  зависит от отношения  $\frac{\Delta\lambda}{\Delta\alpha} \approx \frac{\partial |E_y| / \partial \lambda}{\partial |E_y| / \partial \alpha} = \frac{F_{E\lambda}}{F_{E\alpha}}$ . Следовательно,

(обусловленную абсолютной ошибкой определения  $\Delta\alpha$ ) абсолютную погрешность  $\Delta\lambda$  нахождения  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  определяет следующее приближённое выражение:

$$\Delta\lambda \approx \frac{F_{E\alpha}}{F_{E\lambda}} \cdot \Delta\alpha(\text{рад}) = \frac{F_{E\alpha}}{F_{E\lambda}} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \Delta\alpha(\text{град}). \quad (2.10)$$

Из (2.10) следует, что обусловленную ошибкой  $\Delta\alpha$  определения угла  $\alpha$  относительную погрешность  $\delta\lambda$  определения  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  характеризует выражение:

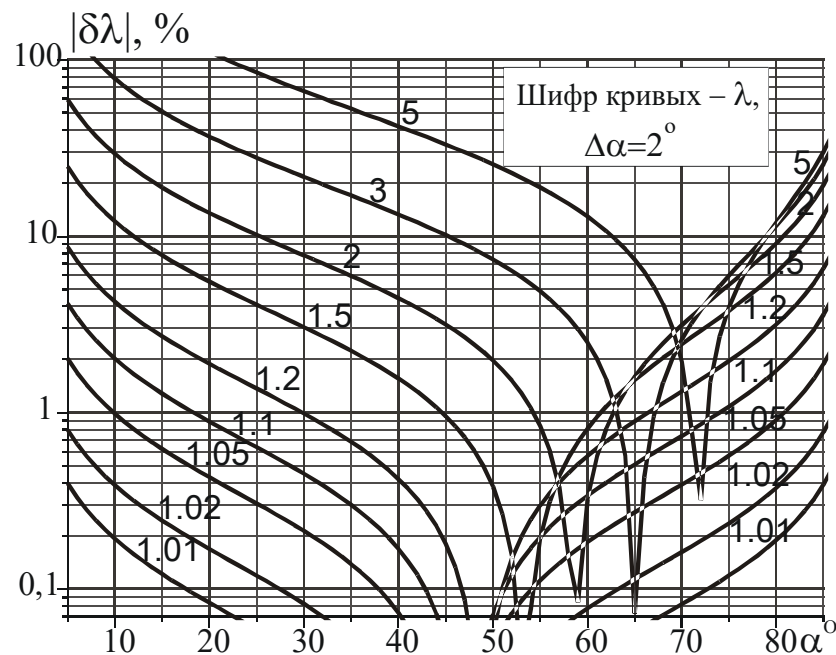
$$\delta\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{F_{E\alpha}}{F_{E\lambda}} \cdot \frac{\Delta\alpha(\text{рад})}{\lambda} = \frac{F_{E\alpha}}{F_{E\lambda}} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\Delta\alpha(\text{град})}{\lambda}. \quad (2.11)$$

На рис. 2.7 приведены полученные на основе выражений (2.6), (2.9), (2.11) результаты расчётов зависимостей абсолютной величины  $|\delta\lambda|$  относительной погрешности  $\delta\lambda$  (в процентах) определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значениям  $|E_y|$  при абсолютной ошибке  $\Delta\alpha$  определения угла  $\alpha$ , равной  $2^\circ$ .



Как видно на рис. 2.7, зависимости абсолютной величины погрешности  $|\delta\lambda|(\alpha)$  от ошибки  $\Delta\alpha$  определения угла  $\alpha$  - не монотонны. Согласно выражениям (2.3), (2.5) и показанным на рис. 2.2,а результатам расчётов, зависимости  $|E_y|(\alpha)$  имеют экстремумы (где производная  $F_{E\alpha} = \partial |E_y| / \partial \alpha = 0$ ). При значениях углов  $\alpha$ , близких к тем, при которых на кривых  $|E_y|(\alpha)$  величина  $|E_y|$  имеет максимальное значение, погрешность  $|\delta\lambda|$  - минимальна.

Результаты расчётов на рис. 2.7 показывают, что при заданной ошибке  $\Delta\alpha$  измерения угла  $\alpha$  погрешность  $|\delta\lambda|$  определения коэффициента анизотропии  $\lambda$



**Рис. 2.7.** Зависимости относительной погрешности  $|\delta\lambda|$  определения коэффициента  $\lambda$  от абсолютной погрешности  $\Delta\alpha$  определения угла  $\alpha$ .

Абсолютная погрешность  $\Delta\alpha=2^\circ$

существенно зависит от величин  $\alpha$  и  $\lambda$ . Эта погрешность растёт с увеличением  $\lambda$  и приближением углов  $\alpha$  к  $0^\circ$ , либо к  $90^\circ$ . При типичных для большинства анизотропных горных пород невысоких (не намного превышающих единицу) значениях коэффициента  $\lambda$  этот коэффициент может быть определён с небольшой погрешностью при широких пределах изменения угла  $\alpha$ . Например, как видно на рис. 2.7, при  $\Delta\alpha=2^\circ$  и  $\lambda=2$  этот коэффициент может быть определён с погрешностью  $|\delta\lambda|$ , не превышающей 10%, если угол  $\alpha$  больше  $25^\circ$

и меньше  $80^\circ$ . При тех же остальных условиях, но при  $\lambda=1.5$  соответствующие пределы изменения  $\alpha$ :  $12^\circ - 83^\circ$ , а при аномально-высокой величине  $\lambda=5$  эти пределы –  $62^\circ - 79^\circ$ . Последнее означает, что при указанной выше ошибке  $\Delta\alpha$  в измерении угла  $\alpha$  и аномально-высоких значениях коэффициента анизотропии  $\lambda$  этот коэффициент, как правило, не может быть определён с небольшой погрешностью по результатам измерений величины  $|E_y|$  на оси переменного магнитного диполя. Можно лишь установить то, что коэффициент  $\lambda$  имеет величину, значительно превышающую единицу.

Отметим ещё следующее. При геофизических исследованиях скважин значительное влияние на результаты измерений могут оказывать физические и геометрические параметры скважины. Для теоретического изучения этого влияния на "показания" рассматриваемого в этой работе зонда потребовалось бы разработка весьма сложных алгоритмов численного решения прямых задач электродинамики для трёхмерных моделей среды. Поэтому для выяснения вопроса о том, можно ли выявить анизотропные пласты при измерениях в скважинах с показанным на рис. 2.1 зондом, было проведено физическое моделирование. О результатах физического моделирования и некоторых проблемах, которые требовалось решить при этом моделировании, сказано в главах 3, 4 этой работы.

### Выводы

1. В электрически анизотропной среде на оси переменного магнитного диполя в ближней зоне одна из составляющих электрического поля  $\mathbf{E}$  ( $\text{Im}E_y$ ) зависит только от одного электрического параметра среды - коэффициента анизотропии  $\lambda$  (см. рис. 2.1 и выражения (2.3)). Кроме того, согласно (2.5), в ближней зоне магнитного диполя справедливо неравенство  $|\text{Im}E_y| \gg |\text{Re}E_y|$  и, следовательно,  $|E_y| \approx |\text{Im}E_y|$ . То, что в ближней зоне амплитуда составляющей  $\text{Im}E_y$  (для определения которой нужны измерения фаз) близка к амплитуде компоненты  $E_y$ , позволило упростить методику измерений для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  при физическом моделировании.

2. В соответствии с (2.3), (2.5) величины  $|\text{Im}E_y|$  и  $|E_y|$  на оси переменного магнитного диполя пропорциональны частоте  $f = \omega/2\pi$ . Увеличение частоты  $f$  ведёт к пропорциональному  $f$  возрастанию "полезного сигнала"  $|E_y|$  при проведении измерений, что может иметь значение в условиях влияния помех. Но для того, чтобы величина  $|E_y|$  зависела лишь от одного электрического параметра среды - коэффициента анизотропии  $\lambda$  - необходимо выполнение неравенства  $|k_t^2| L^2 \ll 1$  или  $f \ll \rho_t / (2\pi \cdot \mu_0 \cdot L^2)$ . Последнее условие ограничивает максимальное значение частоты  $f$  при определении коэффициента анизотропии  $\lambda$  по результатам измерений с рассматриваемым в этой работе зондом электромагнитного каротажа.

3. Проведены расчёты для 1-D модели среды "анизотропный пласт в изотропной вмещающей среде". Из результатов этих расчётов следует, что если мощность  $H$  анизотропного пласта соизмерима с длиной  $L$  зонда, то по участку кривой  $|E_y|$  против средней части пласта можно определить такое значение  $|E_y|$ , которое практически не зависит от влияния ограниченной мощности пласта (рис. 2.4, 2.5). При выполнении этого условия и известном угле  $\alpha$  для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  пласта можно воспользоваться полученной для модели однородной анизотропной среды номограммой, пример которой приведен на рис. 2.2,а.

4. Для модели однородной анизотропной среды при выполнении неравенства  $f \ll \rho_t / (2\pi \cdot \mu_0 \cdot L^2)$ , то есть при  $|k_t^2| L^2 \ll 1$ , получены приближённые выражения (2.7) - (2.11). Результаты численных расчётов на основе этих выражений показали то, какое влияние оказывают ошибки измерения величины  $|E_y|$  и угла  $\alpha$  на погрешность определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  (рис. 2.6, 2.7).

## ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА НОВОГО ПО КОНСТРУКЦИИ ЗОНДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

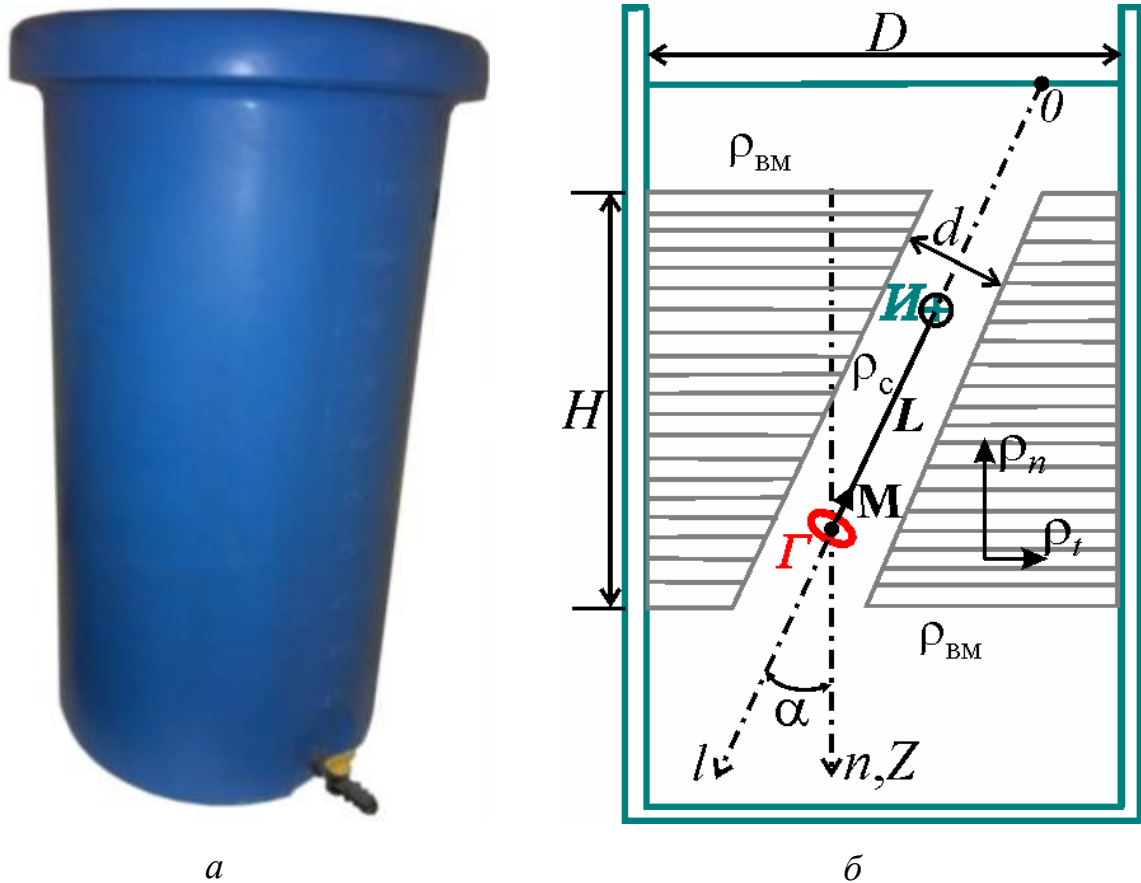
### 3.1. Модели среды в лабораторных установках при физическом моделировании

Проведению физического моделирования предшествовало разработка и конструирование в лабораторных условиях моделей пройденных скважиной анизотропных пластов. Исходя из того, что, например, для условий Западной Сибири коэффициент анизотропии нефтенасыщенных тонкослоистых пластов - коллекторов меняется в пределах от 1.4 до 1.8. [20], необходимо было найти доступный материал, легкий в обработке и, при этом, имеющий коэффициент анизотропии, который могут иметь горные породы.

Первоначально предполагалось проводить измерения на модели, анизотропный пласт которой представлен чередованием слоев пенопласта толщиной 30 мм и воздушно-пузырьковой пленки (материал полиэтилен), изотропные вмещающие породы и скважину должна была имитировать водопроводная вода [52; 56]. Однако пласт в такой модели обладал большим величине удельным электрическим сопротивлением –  $10^{10}$  Ом·м, несопоставимым с условиями описанными в главе 1 и коэффициентом анизотропии  $\lambda$  порядка  $n \cdot 100 - n \cdot 1000$  единиц. Такой высокий коэффициент анизотропии также не свойственен типичным параметрам горных пород, поэтому было принято решение отказаться от такой модели. Опыт предыдущих исследователей, в частности М. Д. Кауркина, [35], который использовал слои мебельного картона в качестве одной из моделей анизотропного пласта, позволил остановить выбор именно на картоне, как слабоанизотропном материале, изотропные вмещающие породы в модели имитировала водопроводная вода.

Для физических экспериментов одна из моделей пройденного скважиной пласта из картона с немного превышающим единицу коэффициентом анизотропии была помещена в бак из пластика, диаметром 450 мм, высотой 850

мм, объемом 120 литров (рис. 3.1,*a*). Модель пласта должна быть полностью погружена в воду. В нижней части бака предусмотрен сливной кран, а на дне – подставка из непроводящего и немагнитного материала (древесина), на которую была помещена модель пласта.



**Рис. 3.1.** Бак, в котором было проведено физическое моделирование (*a*) и схема лабораторной установки (*б*)

Модель анизотропного пласта с не значительно превышающим единицу коэффициентом электрической анизотропии  $\lambda$  была первоначально сконструирована из 30 слоев мебельного картона. Толщина одного слоя картона, влажного в связи с его длительным нахождением в воде, была равна примерно 4.2-4.3 мм, соответственно мощность  $H$  модели анизотропного пласта, для которой были получены первые экспериментальные результаты, была равна 130 мм. Слои картона имели форму прямых круговых цилиндров диаметром немного меньше, чем диаметр бака (приблизительно 400 мм).

Продольное удельное электрическое сопротивление пропитанного водопроводной водой пласта из картона  $\rho_r \approx 100-150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Другая серия экспериментов была проведена на модели, соответствующей пласту с очень высоким коэффициентом электрической анизотропии  $\lambda$ . Такая модель пласта была сконструирована из чередующихся слоёв картона толщиной 16 мм и полиэтиленовой пленки (толщина 0.007 мм, удельное электрическое сопротивление  $\rho \approx 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Численные оценки на основе выражений, приведенных в работе [16] позволили сделать следующий вывод. Коэффициент анизотропии такой модели пласта имеет аномально-высокое и не типичное для горных пород значение коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  ( $\lambda \approx 50$ ). Но, вместе с тем, результаты измерений, полученные для модели пласта с таким аномально-высоким значением коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$ , в дальнейшем послужили для определения величины магнитного момента генераторного переменного магнитного диполя. О том, как это было сделано, будет сказано ниже (в разделе 3.3).

Как было отмечено выше, первые две серии экспериментов (физического моделирования) были проведены для двух, существенно различающихся по значению коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  моделей пройденного скважиной пласта. В первом случае (модель пласта из большого числа слоёв картона) величина коэффициента  $\lambda$  – лишь немного больше единицы. Во второй модели пласта, сконструированной из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки, коэффициент анизотропии  $\lambda$  пласта имеет аномально высокое значение, значительно превышающее то значение  $\lambda$ , которое может быть присуще электрически анизотропным горным породам.

Было принято решение получить результаты физического моделирования и опробовать методику определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  пройденного скважиной пласта по результатам измерений для случая, когда величина  $\lambda$  близка к тем значениям, которые могут быть типичны для электрически анизотропных горных пород. По данным, опубликованных в статьях по этой

тематике [20], коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$  горных пород обычно не превышает нескольких единиц.

Поэтому было принято решение о том, что для опробования методики определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  пройденных скважиной пластов необходимо провести ещё две серии экспериментов для моделей пластов с "умеренным" значением коэффициента электрической анизотропии. Для уменьшения величины коэффициента анизотропии в модели пласта из чередующихся прослоев картона и полиэтилена, в полиэтиленовой пленке были проделаны отверстия. Эти отверстия (круглой формы) были проделаны равномерно в прослоях из полиэтилена модели пласта. Для такой модели пласта было проведено две серии экспериментов. Первая из них - при 100 отверстиях на квадратный метр. Во второй серии экспериментов число отверстий было увеличено в 2 раза.

Отверстие в форме кругового цилиндра диаметром  $d=20$  мм, проделанное в модели пласта под острым углом к слоям картона имитировало скважину (см. рис. 3.1,б). Для уменьшения возможного влияния стенок бака на результаты измерений положение отверстия было выбрано вблизи центра модели среды. В связи с тем, что, в соответствии с результатами расчётов (см. рис. 2.2,а), коэффициент анизотропии влияет на величину  $|E_y|$  при острых углах  $\alpha$  между осью зонда и осью анизотропии, сначала имитирующее скважину отверстие было пройдено под углом  $\alpha=30^\circ$  к оси анизотропии модели пласта.

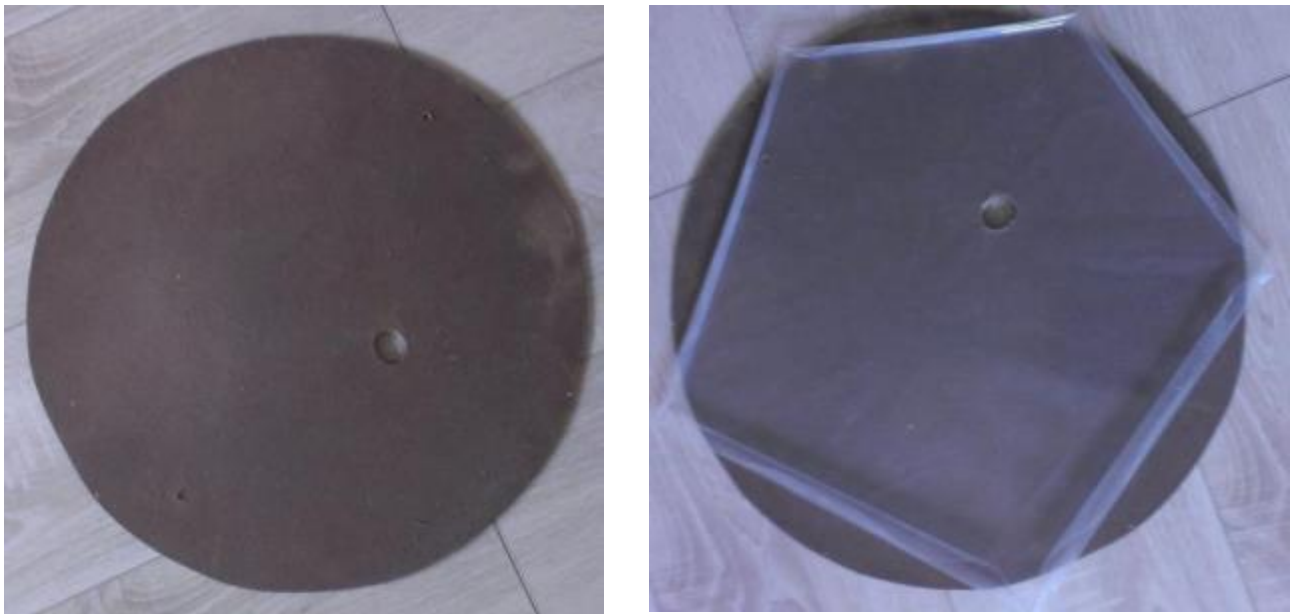
Учитывая составную конструкцию модели (30 слоев картона), 30 отверстий совмещаются только в одном единственном положении. Применение клея в данной ситуации могло неконтролируемо увеличить коэффициент анизотропии модели, поэтому было принято решение воспользоваться механическим способом скрепления слоев картона. Для этого у противоположных краев модели были пройдены два дополнительных отверстия малого диаметра, в которые вставлены деревянные штифты.

После проведения первых серий экспериментов, было принято решение провести новые исследования при другом угле  $\alpha$ , равном  $45^\circ$ . В центральной

части модели был выбран участок, отдаленный от уже имеющегося отверстия (при  $\alpha=30^\circ$ ), и проделано новое отверстие под углом к оси анизотропии модели пласта  $\alpha$ , равном  $45^\circ$ .

Изотропные вмещающие пласт породы, а также скважину (промывочную жидкость) в модели имитировала водопроводная вода. Результаты измерений лабораторным резистивиметром показали, что удельное электрическое сопротивление воды, применённой при лабораторных экспериментах равно 30 Ом·м. Чтобы не учитывать возможные сезонные изменения удельного электрического сопротивления водопроводной воды, было принято решение заготовить необходимый объем водопроводной воды заранее и хранить ее в баке (рис. 3.1,*a*) и закрытых пластиковых емкостях.

Примеры использованных при изготовлении моделей анизотропных пластов материалов приведены на рис. 3.2.



**Рис. 3.2.** Материалы модели анизотропных пластов  
Мебельный картон (слева), мебельный картон и ПЭТ пленка (справа)

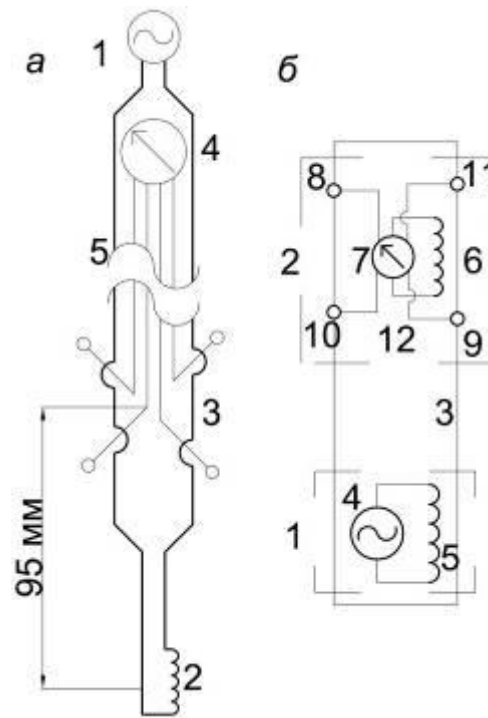


### 3.2. Прототип зонда и измерительная аппаратура при физическом моделировании.

Измерения проводились с помощью сконструированного автором этой работы прототипа зонда (рис 3.3, 3.4). Прототип зонда состоял из следующих узлов: генераторная антенна  $\Gamma$  – многовитковая катушка на ферритовом сердечнике; измерительный блок из двух взаимно-перпендикулярных и ортогональных оси зонда измерительных линий  $MN$  и  $M'N'$ , обозначенных  $I$  на рис. 3.1,б. За точку записи прототипа зонда был принят центр измерительных линий. Генераторная антенна  $\Gamma$  и измерительные линии  $MN$ ,  $M'N'$  были закреплены на каркасе из пластика, для обеспечения неизменного их взаимного положения при перемещении прототипа зонда в модели скважины. При проведении большинства лабораторных измерений расстояние между центрами генераторной антенны  $\Gamma$  и измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$  (длина зонда  $L$ ) было равно 95 мм. Длины линий  $MN$ ,  $M'N'$  – 18 мм. Чтобы показать, какое расстояние между центрами генераторной антенны  $\Gamma$  и датчиков  $I$ , а также то, в какой последовательности (сверху вниз) расположены  $\Gamma$ ,  $I$ , было использовано обозначение по аналогия с зондами электромагнитного каротажа. Поэтому прототип зонда длиной 9.5 см обозначим  $И0.095\Gamma$ . На рис. 3.4,б. также показана схема другого зонда, отличие которого от описанного выше состоит в том, что он содержит измерительную катушку, предназначенную для определения первичного магнитного поля  $H^I$  генераторной катушки. Как будет показано в разделе 3.3 при измерениях существует необходимость контролировать эту величину для определения коэффициента анизотропии.



Рис. 3.3. Прототип зонда электромагнитного каротажа  $И0.095\Gamma$



**Рис 3.4.** Блок-схема прототипа зонда *ИЮ.095Г* (а) и "перспективного" зонда (б)

а) 1 – генератор сигнала, 2 – генераторная катушка, 3 – измерительный блок,  
4 – измеритель, 5 – соединительные провода;

б) 1 – генераторный блок, 2 – измерительный блок, 3 – корпус, 4 – генератор, 5 –  
генераторная катушка, 6 – катушка контроля первичного поля, 7 – измеритель сигнала, 8-9,  
10-11 – пары взаимно перпендикулярных электродов, 12 – соединительные провода

Для соединения прототипа зонда с генераторным и измерительным блоками использован коаксиальный кабель. Генераторный блок состоял из генератора сигнала синусоидальной формы и колебательного контура, настраиваемого в резонанс с рабочей частотой. Для измерений был применён цифровой осциллограф. Измеряемыми величинами были напряжения  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}'$  электрического поля  $\mathbf{E}$  в линиях  $MN$  и  $M'N'$ . Соответствующие направлению этих линий компоненты поля  $\mathbf{E}$  были определены как отношения напряжений к длинам линий.

При проведении большинства измерений использован генератор сигнала оригинальной конструкции, выполненный на интегральной микросхеме ICL8038 (рис. 3.5, 3.6) [62]. Микросхема ICL8038 предназначена для построения прецизионного функционального генератора с частотой генерации

от 0.01 Гц до 300 кГц. Микросхема выпускается в корпусе DIP с 14 выводами. Некоторые технические характеристики (общие и для синусоидального сигнала – другие формы в данной работе не использовались) приведены в таблице 3.1

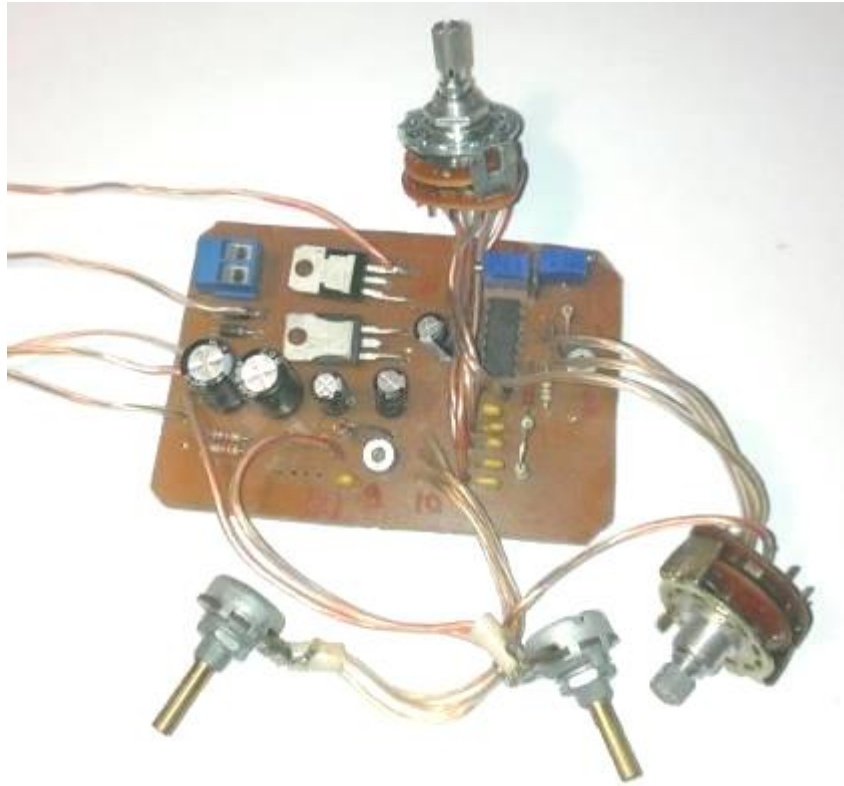


Рис. 3.5. Функциональный генератор на интегральной микросхеме ICL8038

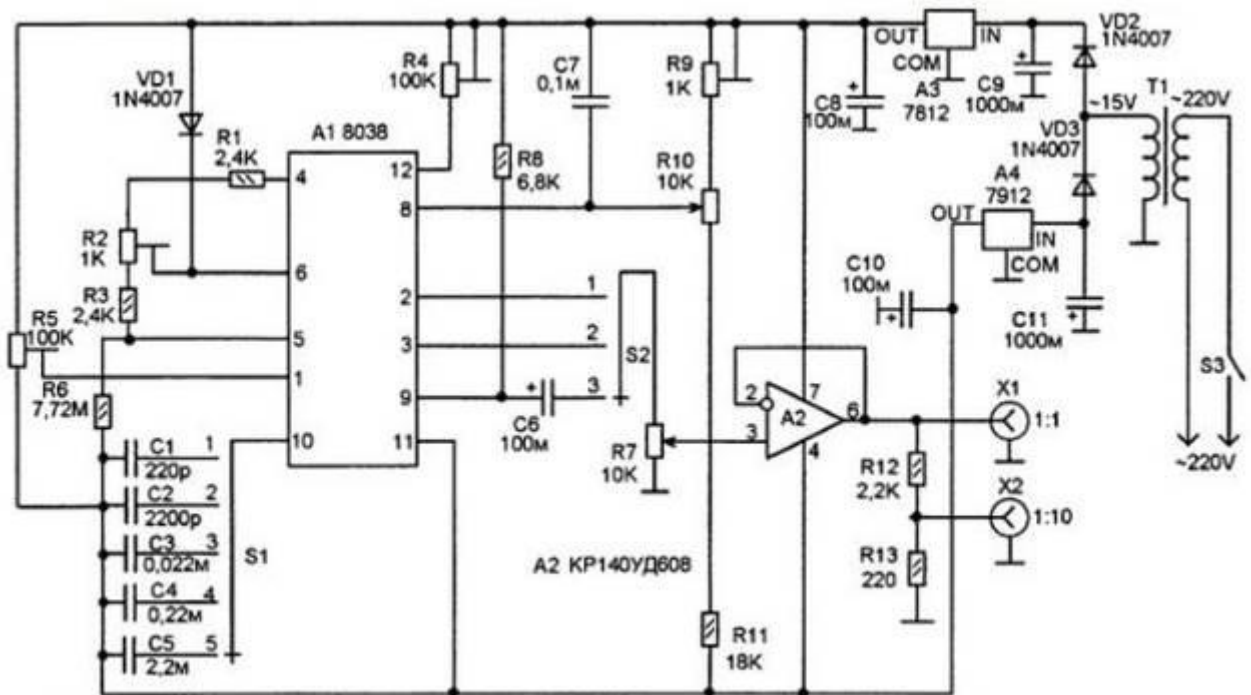


Рис. 3.6. Принципиальная схема функционального генератора

таблица 3.1

## Технические характеристики интегральной микросхемы ICL8038

форма генерируемого сигнала	синусоидальный прямоугольный пилообразный
диапазон генерируемых частот	0.01 Гц ... 300 кГц
коэффициент нелинейных искажений синусоидального сигнала для ICL8038CC	1.5%
температурный дрейф частоты для ICL8038CC	250 ppm/°C
дрейф частоты от изменения напряжения питания	0.05%/В
выходное сопротивление	200 Ом
выходной уровень синусоидального сигнала	до 6.2 В

Измерение сигнала в приемных линиях было проведено с помощью цифрового USB-осциллографа HANTEK DSO-6022BE (рис. 3.7) и персонального компьютера (ПК). Технические характеристики прибора с сайта производителя [101] приведены в таблице 3.2.

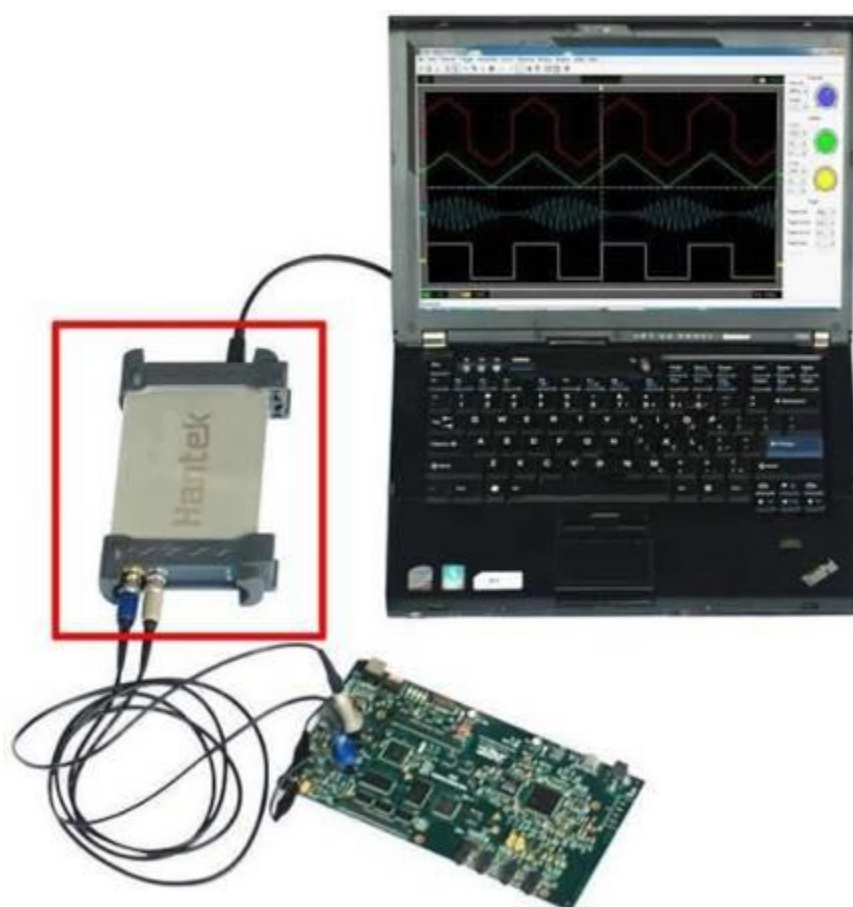


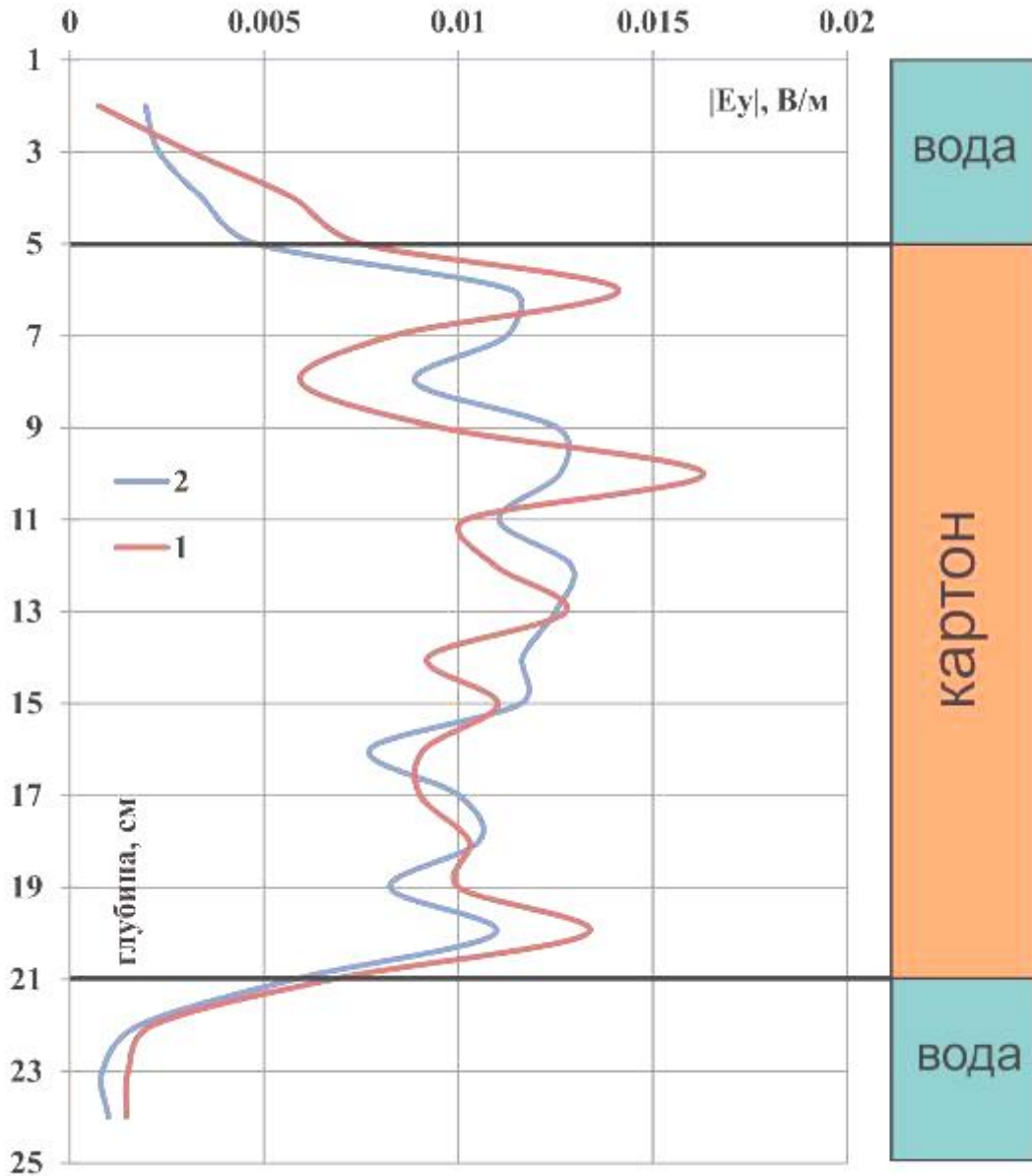
Рис. 3.7. USB-осциллограф HANTEK DSO-6022BE

Таблица 3.2

## Технические характеристики HANTEK DSO-6022BE

Каналов	2
Полоса пропускания	при 20мВ,50мВ,100мВ /деление - 5 МГц при 200мВ / деление - 10 МГц при 500мВ, 1В, 2В, 5В - 20 МГц
Частота дискретизации (выборки в секунду)	48 МГц (48 Мвыб./с) в одноканальном режиме 24 Мвыб/с в двухканальном
Размер буфера	1нс-2мкс - 1К 5мкс-2мс - 128К 5мс-20мс - 512К 50мс-5000с - 1М
Максимальная амплитуда сигнала	+/- 4.5В
Импеданс	1 Мегаом 25пФ
Режим входа	только открытый (DC)
Вертикальное разрешение	8 бит
Диапазоны	20 мВ-5В, 8 шагов
Точность по постоянному току	±3%
Временные диапазоны	1 нс-5000с
Управление вертикальным положением	Да
Защита входа	Диод
X-Y	Да
Режимы синхронизации	авто, ждущий, однократный
Виды синхронизации	По растущему фронту, по спадающему фронту
Управление уровнем запуска	Да
Источник синхронизации	канал 1 (CH1), канал 2 (CH2)
Измерения курсором	Да
Питание	USB

Для подтверждения достоверности результатов измерений был применен внутренний и внешний контроль. Внутренний контроль проводился путем многократной записи каждого эксперимента в серии с последующим анализом. Каждая серия экспериментов – это 5 - 6 изменений кривых напряжений  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}'$  электрического поля  $\mathbf{E}$  в линиях  $MN$  и  $M'N'$  против модели пласта. Осреднение результатов, полученных в такой серии измерений, позволяло получить одну кривую против пласта, в меньшей степени зависящую от влияния помех. При сравнении кривых, полученных при серии экспериментов для той или иной модели анизотропного пласта, было установлено, что различие средних значений напряжений  $\mathcal{E}$  против пласта, как правило, не превышали 10% (рис. 3.8).



**Рис. 3.8.** Сопоставление результатов двух измерений против одной из моделей анизотропного пласта

Внешний контроль достоверности результатов физического моделирования был проведен на основе измерения напряжений  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}'$  электрического поля  $\mathbf{E}$  в линиях  $MN$  и  $M'N'$  при помощи другого измерительного прибора – аналогового осциллографа С1-55 (рис. 3.9). Технические характеристики даны в таблице 3.3.

Результаты экспериментов показали, что, что средние значения величин  $|E_y|$  против моделей анизотропных пластов, полученных с разной

измерительной аппаратурой, имеют расхождение, не выше 10%. (рис. 3.10). При этом, конечно, преимуществом измерений с цифровым осциллографом является регистрация измеряемого напряжения в формате, пригодном для обработки получаемых данных на компьютере.

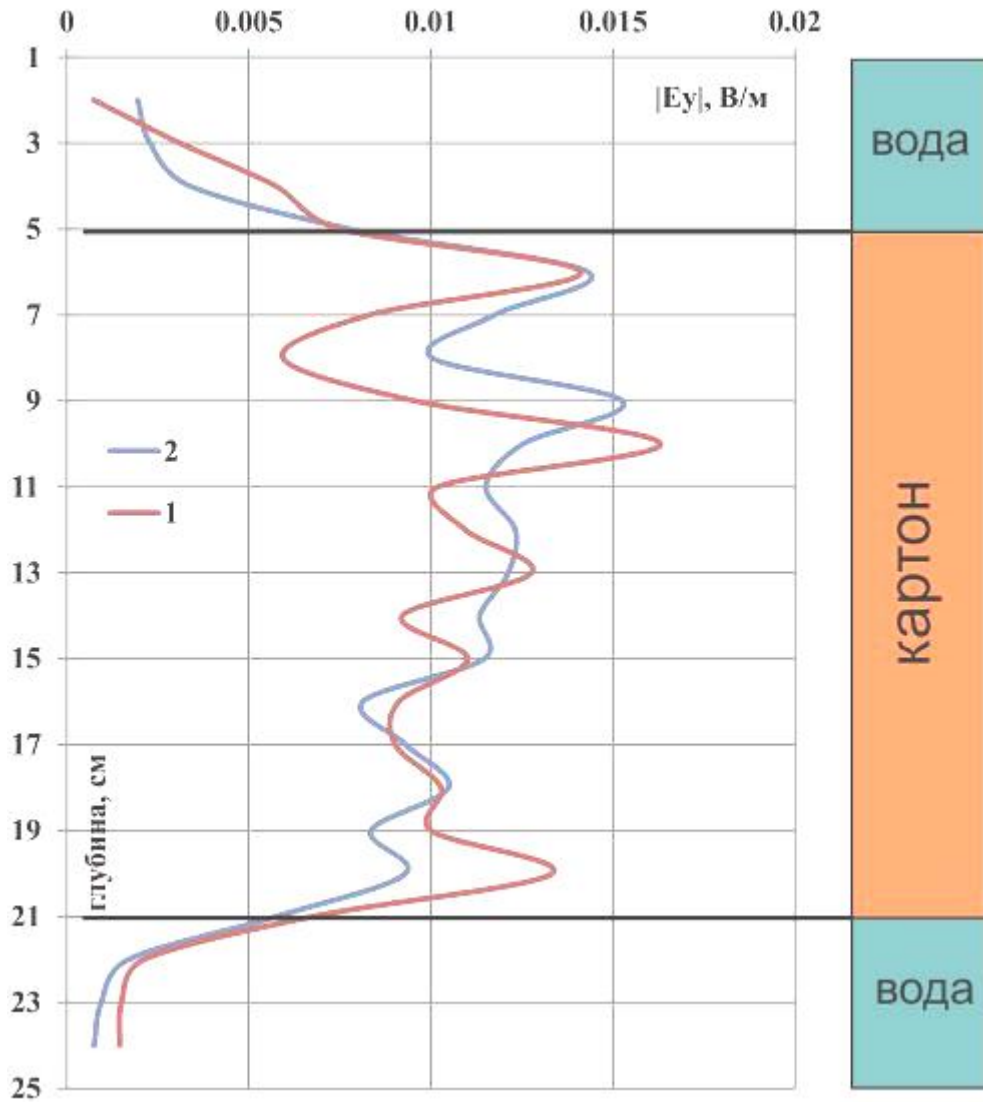


Рис. 3.9. Осциллограф C1-55

Таблица 3.3

технические характеристики осциллографа C1-55

тип осциллографа	двухлучевой
полоса пропускания	0-10 МГц
время нарастания	35 нс
коэффициент отклонения	10 мВ/дел-20 В/дел
входное сопротивление и емкость	1 МОм, 40 пФ
коэффициент развертки	0.02 мкс/дел-20 мс/дел
режим работы развертки	автоколебательный, ждущий
синхронизация	внутренняя и внешняя
погрешность измерений амплитуды и временных интервалов	не более 10%
количество независимых усилителей	2



**Рис. 3.10.** Сопоставление результатов измерений цифровым (1) и аналоговым (2) осциллографами

### **3.3. Технические решения, применённые для выявления влияния помех при физическом моделировании и для уменьшения влияния помех**

Все результаты физического моделирования были получены не в специально оборудованной лаборатории, а в одном из помещений в МГРИ-РГГРУ. В отличие от тех условий, которые характерны при проведении (на практике) электромагнитного каротажа, в городе Москве – высокий уровень имеющего разное происхождение электромагнитного поля в широком диапазоне частот. Поэтому важным, требующим решения, вопросом при



физическом моделировании было увеличение отношения полезный сигнал/помеха.

При обработке результатов первых лабораторных экспериментов было выявлено значительное влияние ЭМ помех на результаты измерений. Это проявилось в повышенной амплитуде сигнала не сопоставимой с аналитически рассчитанными значениями. Во-первых, так как эксперименты проведены в г. Москва, значительная часть помех имеет индустриальную природу. Во-вторых, на напряжение в измерительных линиях оказывала влияние работы генератора.

Электромагнитные помехи представлены широким спектром частот от электрических сетей 50 Гц до разного рода радиосигналов (радио-, телекоммуникационные, портативных радиостанций) до первых ГГц у мобильных сетей четвертого поколения. В частности, частотный диапазон, в котором излучает и принимает сигнал прототип зонда – 1-100 кГц, относится к «диапазону низких частот», применяемому в дальней радиосвязи.

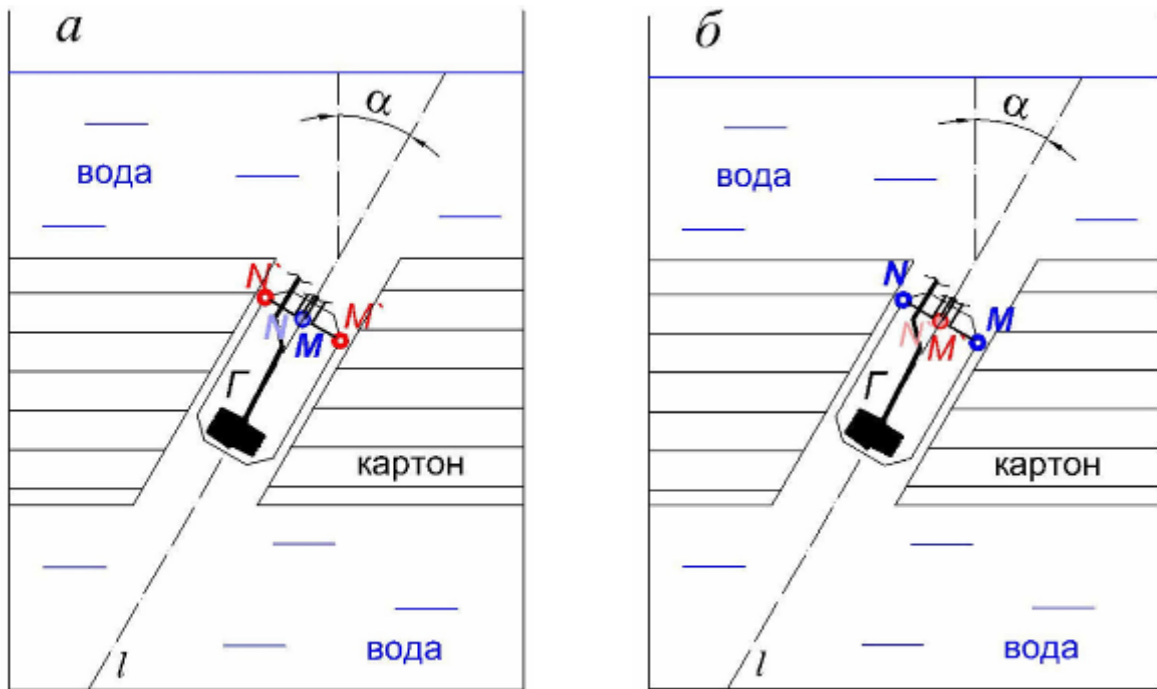
Для снижения влияния индустриальных помех на результаты физического моделирования было применено два подхода. Первый из них связан с использованием специальных (рис. 3.11) материалов: коаксиального кабеля для передачи сигнала от генератора и к измерителю без потерь и ферритового фильтра – для снижения влияния электромагнитных помех, возникающих, когда кабель работает как антенна, то есть возбуждает и принимает электромагнитное поле. Второй подход основан на том, что измеряемый сигнал имеет фиксированную частоту, что делает возможным фильтрацию измеряемого сигнала. При измерении USB-осциллографом применялась цифровая фильтрация, а на «внешнем контроле» при измерениях осциллографом С1-55 был изготовлен полосовой фильтр на основе конденсатора, резистора и катушки индуктивности.



**Рис. 3.11.** Материалы, применённые для уменьшения влияния помех

Что касается выделения полезного сигнала, возбуждаемого генераторным магнитным диполем, на фоне помех, обусловленных работой самого генератора и электрическим током в проводах, то эта ситуация кардинально отличается от описанной выше. Это обусловлено тем, что полезный сигнал и помеха имеют одинаковую частоту. В этом случае применение фильтрации становится невозможным. Однако, в условиях лабораторных экспериментов удалось уменьшить обусловленную работой генераторного блока помеху на результаты измерений, пользуясь следующим приемом. При лабораторных измерениях были известны геометрические параметры моделей среды и зонда. В частности были известны направление оси анизотропии в модели пласта, угол между осью анизотропии и осью модели скважины, а направления измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$  можно ориентировать по заданному направлению. Поэтому перед измерениями можно было провести калибровку, попеременно ориентируя приемные линии  $MN$  и  $M'N'$  ортогонально оси напластования (рис. 3.12). В соответствии с выражениями (2.1) при такой ориентировке измерительной линии  $MN$  полезный сигнал в линии  $M'N'$  равен нулю (рис. 3.12,*a*). Напряжение электрического поля в линии  $MN$  будет суммой полезного

сигнала и помехи, а напряжение в линии  $M'N'$  будет зависеть только от помехи. При повороте прототипа зонда на  $90^\circ$  вокруг своей оси (рис. 3.12,б) напряжение в обеих измерительных линиях испытывают влияние помех, а полезный сигнал влияет только на напряжение электрического поля в линии  $M'N'$ . Такая методика измерений позволяет оценить уровень помехи в измерительных линиях и учесть ее влияние при определении полезного сигнала и величины  $|E_y|$  в лабораторных условиях.

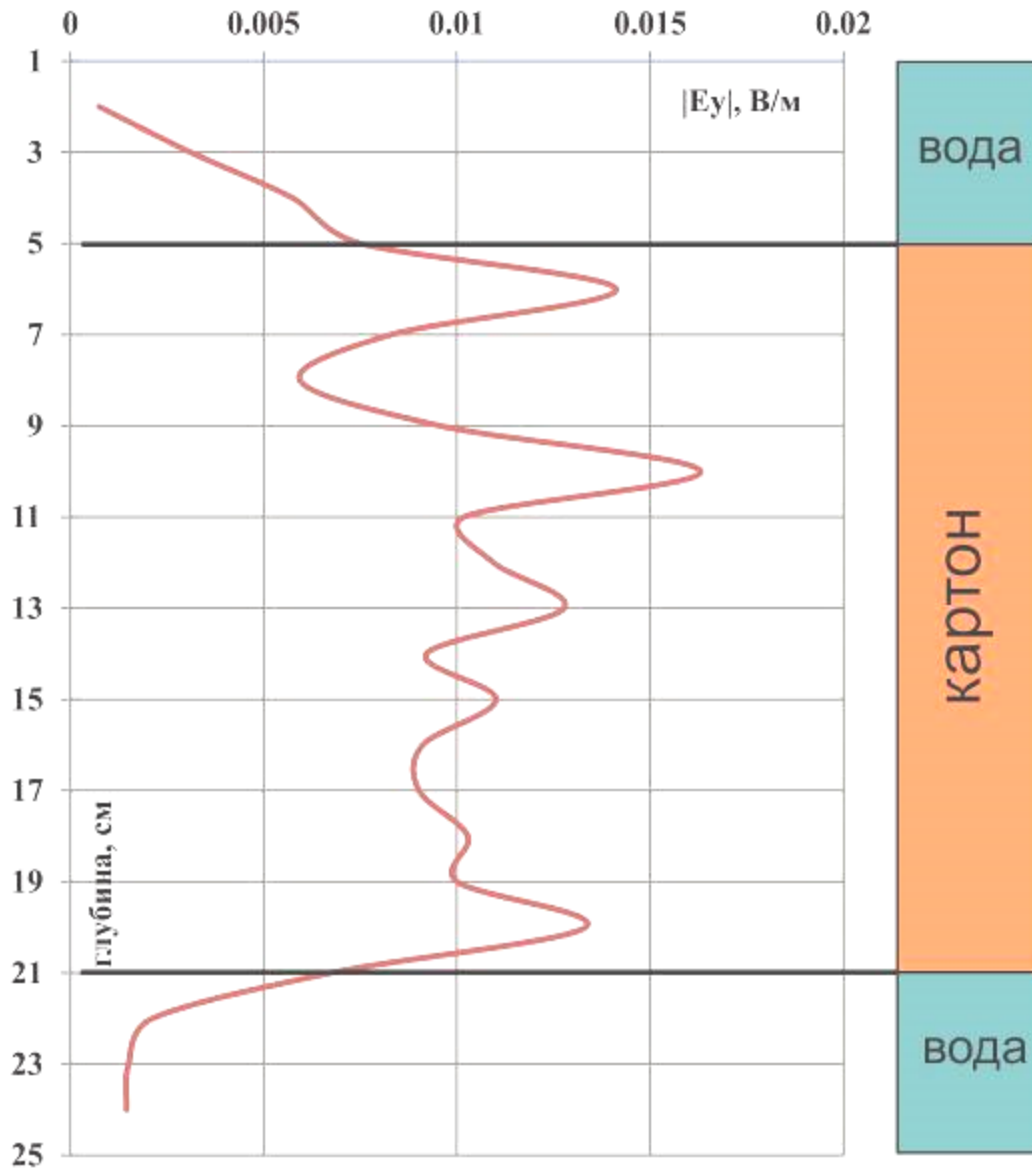


**Рис. 3.12.** К методике, примененной для учета влияния «наводки» с генератора и соединительных проводов на напряжение в измерительных линиях  $MN$  и  $M'N'$

### 3.4. Результаты физического моделирования прототипа нового зонда

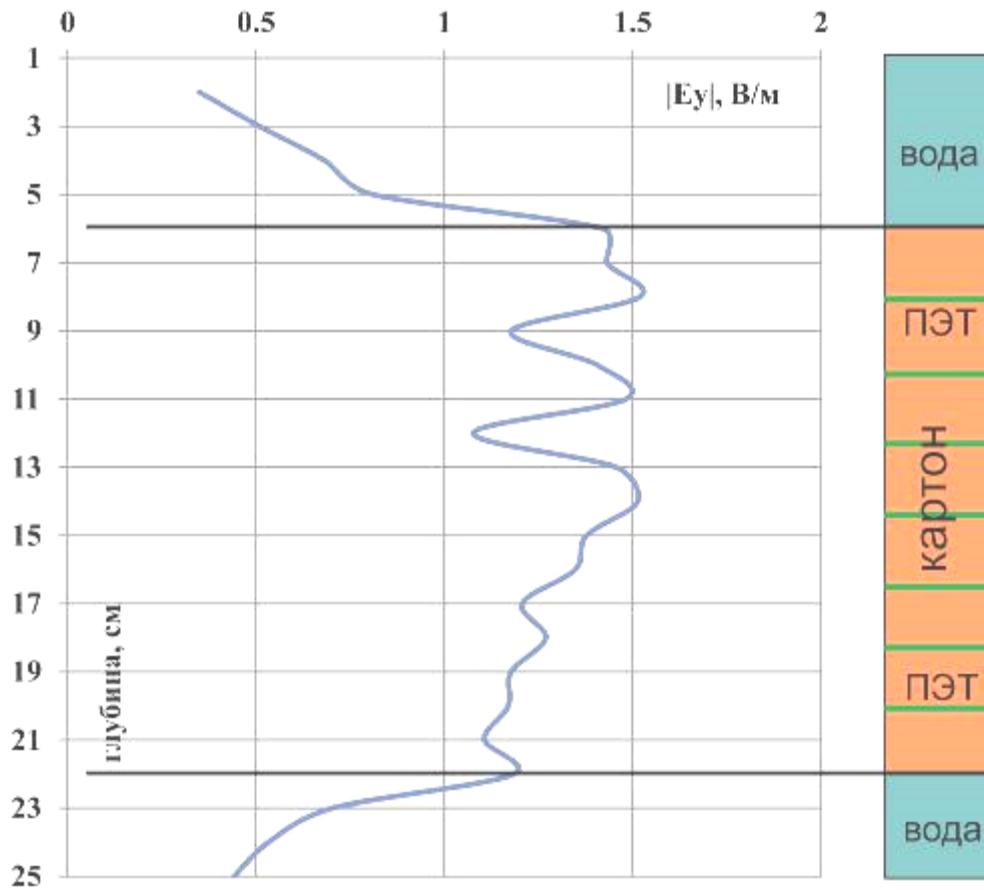
Для подтверждения того, что полученные на основе решения прямой задачи зависимости (2.3), (2.5) остаются справедливыми при расположении зонда в скважине были проведены серии экспериментов, результаты которых приведены в этом разделе. Первые эксперименты были направлены на установление принципиальной возможности при проведении измерений новым зондом определять наличие анизотропной толщи. Для этого произведены измерения в модели, где анизотропный слой представлен картоном (рис. 3.13)

или чередованием слоев картона и полиэтиленовой пленки (рис. 3.14). Физическое моделирование показало, что по результатам измерений с прототипом имеющего новую конструкцию зонда можно уверенно выделить анизотропный слой, расположенный в изотропной вмещающей среде.



**Рис. 3.13.** Результаты физического моделирования прототипа зонда *И0.095Г*.

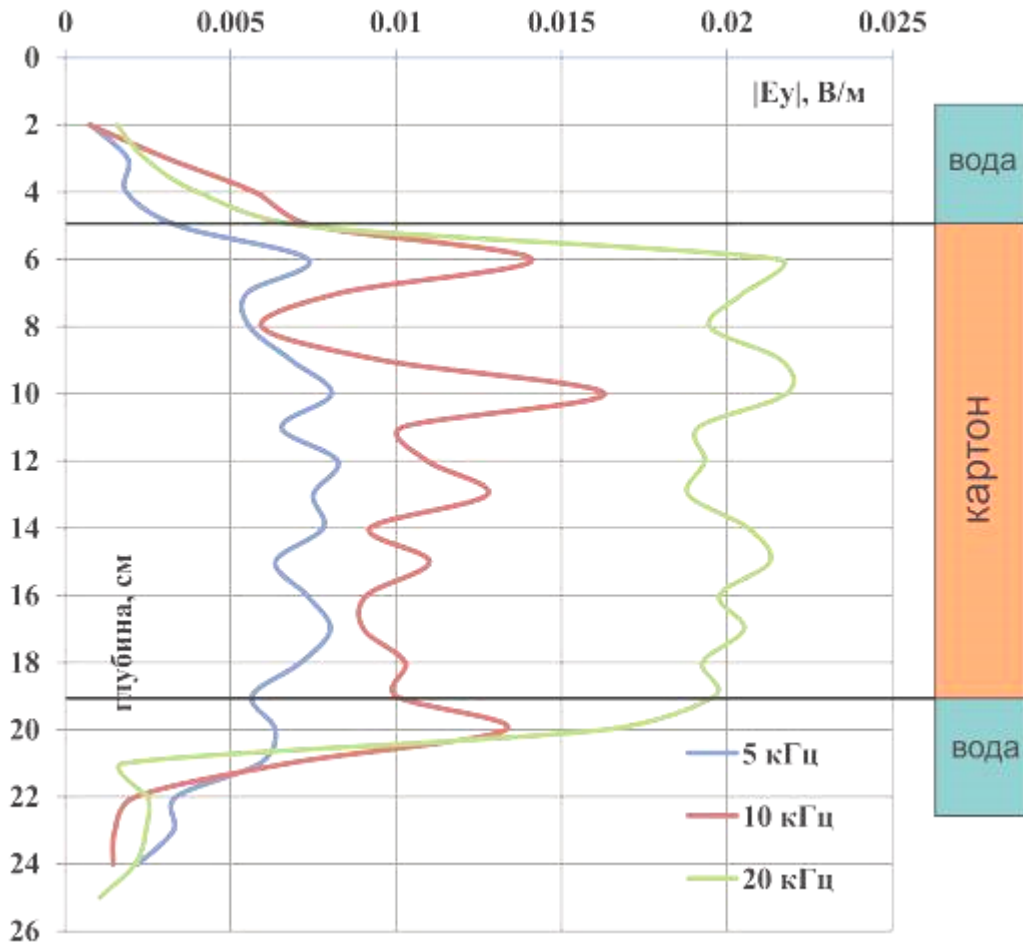
Модель пласта – картон,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$



**Рис. 3.14.** Результаты физического моделирования прототипа зонда ИЮ.095Г.

Модель пласта – картон с ПЭТ,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

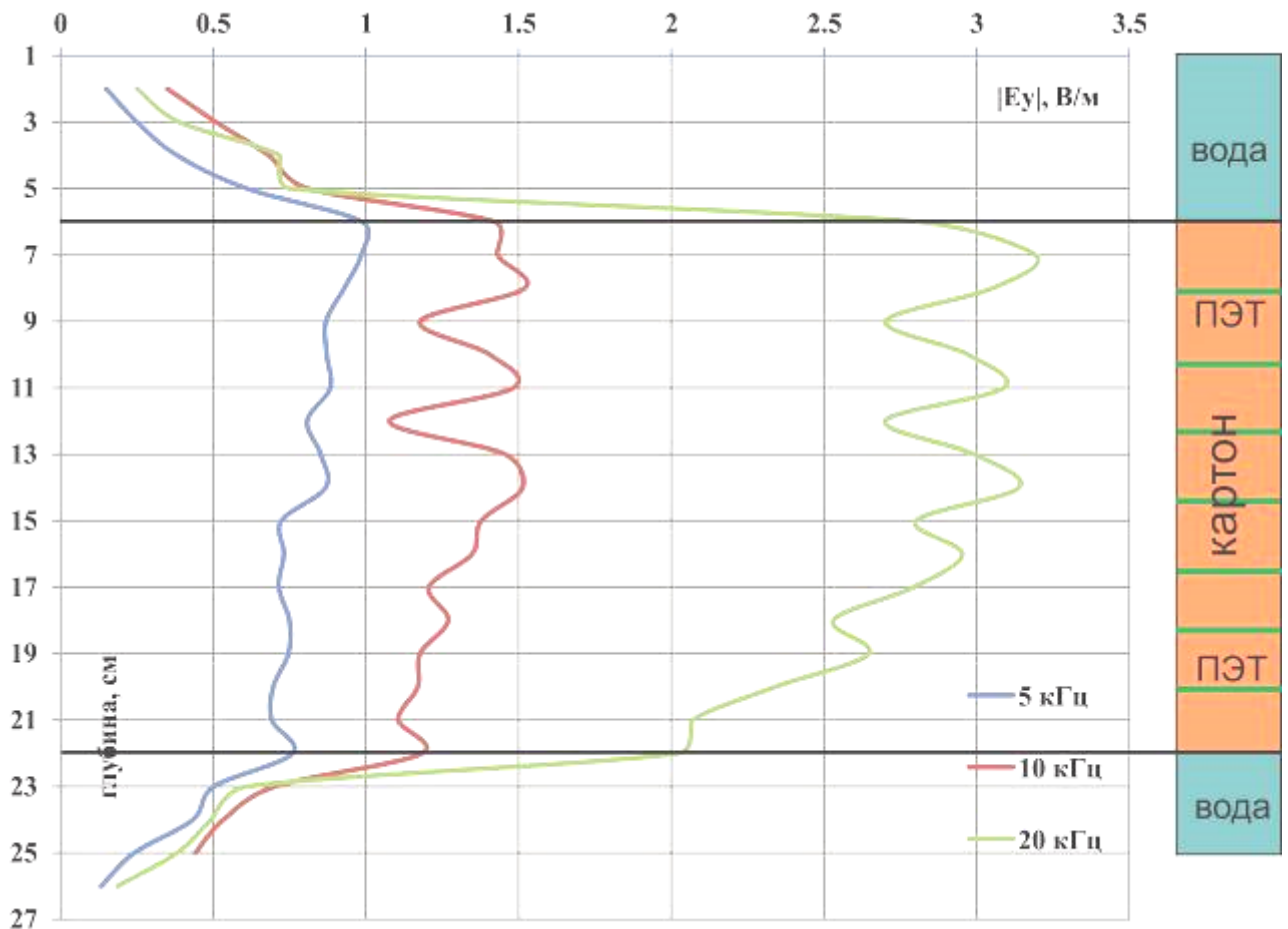
В соответствии с выражениями (2.3), (2.5) величина  $|E_y|$  пропорциональна частоте  $f=\omega/(2\pi)$ . Большая часть результатов физического моделирования была получена при измерениях на частоте  $f=10$  кГц. Для проверки того, какое влияние оказывает частота, были проведены серии измерений для одинаковых моделей среды и при разных частотах  $f$ . Примеры сопоставления результатов измерений, полученных при трёх различных значениях частоты  $f$ , приведены на рис. 3.15, 3.16.



**Рис. 3.15.** Результаты физического моделирования прототипа зонда ИО.095Г.

Модель пласта – картон,  $H=13$  см, разные частоты,  $\alpha=30^\circ$

Как видно на этих рисунках, осреднённые значения напряжения электрического поля в измерительных линиях против анизотропных пластов и определяемая по ним величина  $|E_y|$  пропорциональна частоте  $f$ . Это согласуется с выводами, полученными на основе решения прямой задачи электродинамики для более простой (по сравнению с применённой при физическом моделировании) модели однородной анизотропной среды, в которой величины  $|\text{Im}E_y|$  и  $|E_y|$  определяют выражения (2.3), (2.5).



**Рис. 3.16.** Результаты физического моделирования прототипа зонда ИЮ.095Г.

Модель пласта – картон с ПЭТ,  $H=13$  см, разные частоты,  $\alpha=30^\circ$

Хотя при частоте  $f=20$  кГц был получен более высокий по амплитуде полезный сигнал  $|E_y|$ , чем при частоте 10 кГц, большая часть экспериментов была проведена при частоте 10 кГц. Следует отметить, что повышение частоты хотя и позволяет увеличить полезный сигнал, но может привести к тому, что измерительные линии не будут расположены в ближней зоне генераторного магнитного диполя. Как следует из выражений (2.2), (2.3), (2.5), для того, чтобы величина  $|E_y|$  зависела только от одного электрического параметра среды – коэффициента анизотропии  $\lambda$  – необходимо выполнение неравенства  $|k_t| \cdot L \ll 1$ , а модуль волнового числа  $k_t$  растёт с увеличением частоты. Прототип зонда ИЮ.095Г сконструирован для лабораторных измерений и имеет небольшую длину  $L$  (0.095 м). При такой длине  $L$  зонда и тех значениях  $\rho_t$ , которые имели применённые при моделировании модели пластов, в принципе можно было

проводить измерения при частотах в сотни килогерц. Но для габаритного макета зонда, например, длиной в 1 метр (*И1Г*), при широких пределах изменения параметра  $\rho_t$  горных пород частота  $f$  не может быть очень высокой.

Это можно проиллюстрировать следующим примером. Пусть длина зонда  $L=1$  м, а минимальное ожидаемое значение параметра  $\rho_t$  пройденных скважиной горных пород равно 2 Ом·м. Если при выборе частоты  $f$  потребовать, чтобы произведение  $\delta=|k_t| \cdot L$  не превышало 0.2, то получаем следующее уравнение для определения максимальной частоты  $f$ :

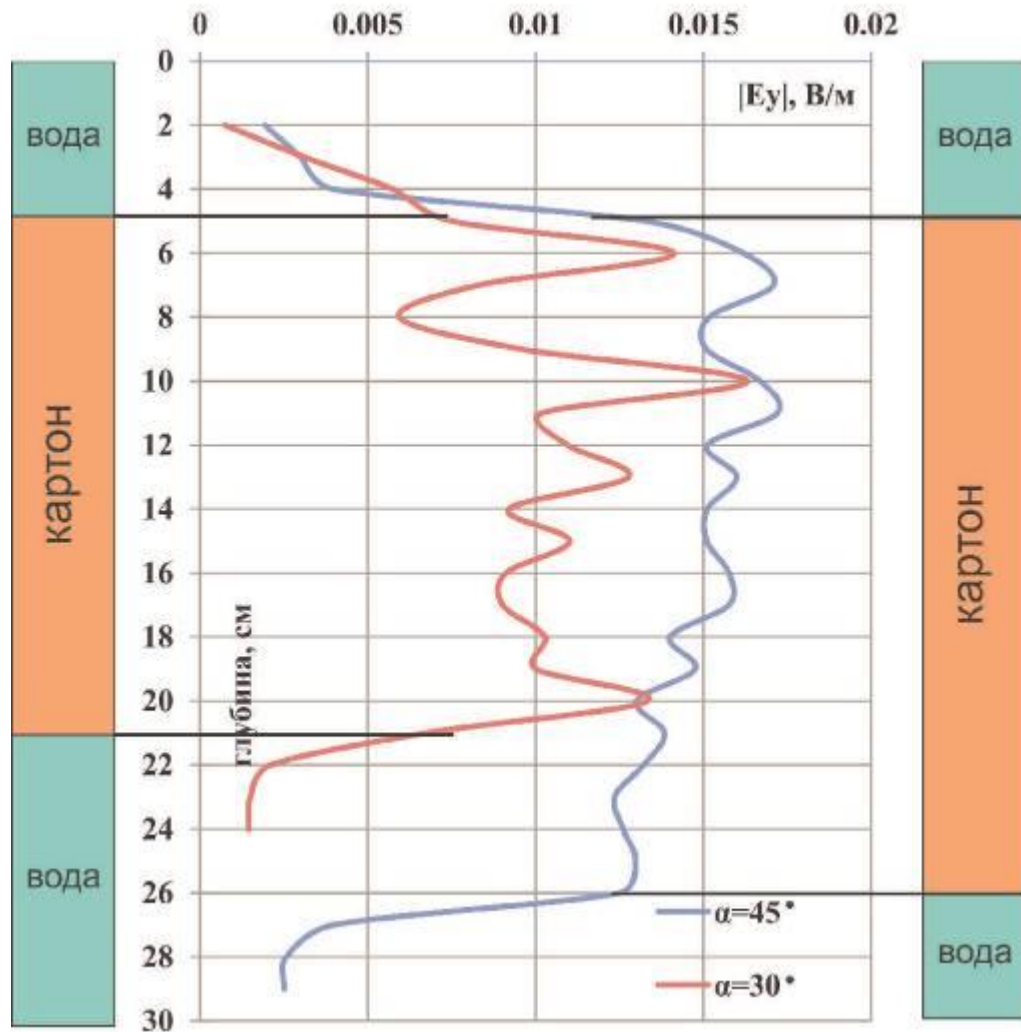
$$|k_t| \cdot L = \sqrt{\frac{2\pi f \cdot \mu_0}{\rho_t}} \cdot L = \sqrt{\frac{2\pi f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{\rho_t}} \cdot L = \delta = 0.2.$$

При указанных выше значениях  $L=1$  м,  $\rho_t=2$  Ом·м решение этого уравнения для частоты:  $f \approx 10^4$  Гц=10 кГц.

На основе приведенной выше оценки, большая часть результатов физического моделирования была получена при частоте  $f=10$  кГц. По-видимому, такое значение  $f$  может быть близко к той частоте, при которой (во многих случаях) целесообразно проводить измерения в скважинах при длине зонда  $L$  до 1 м. Кроме того, при проведении экспериментальных исследований было установлено, что на этой частоте (10 кГц) уровень помех (при проведении измерений в одном из помещений МГРИ-РГГРУ в городе Москве) ниже чем, например, при частоте  $f=50$  кГц и при более высоких частотах.

На рис. 3.17 показаны кривые  $|E_y|$  против модели пройденного скважиной (изготовленного из слоёв картона) анизотропного пласта с немного превышающем единицу коэффициентом электрической анизотропии  $\lambda$  при двух значениях угла  $\alpha$  между осью  $n$  анизотропии пласта и осью  $l$  зонда ( $\alpha=30^\circ$  и  $\alpha=45^\circ$ ).



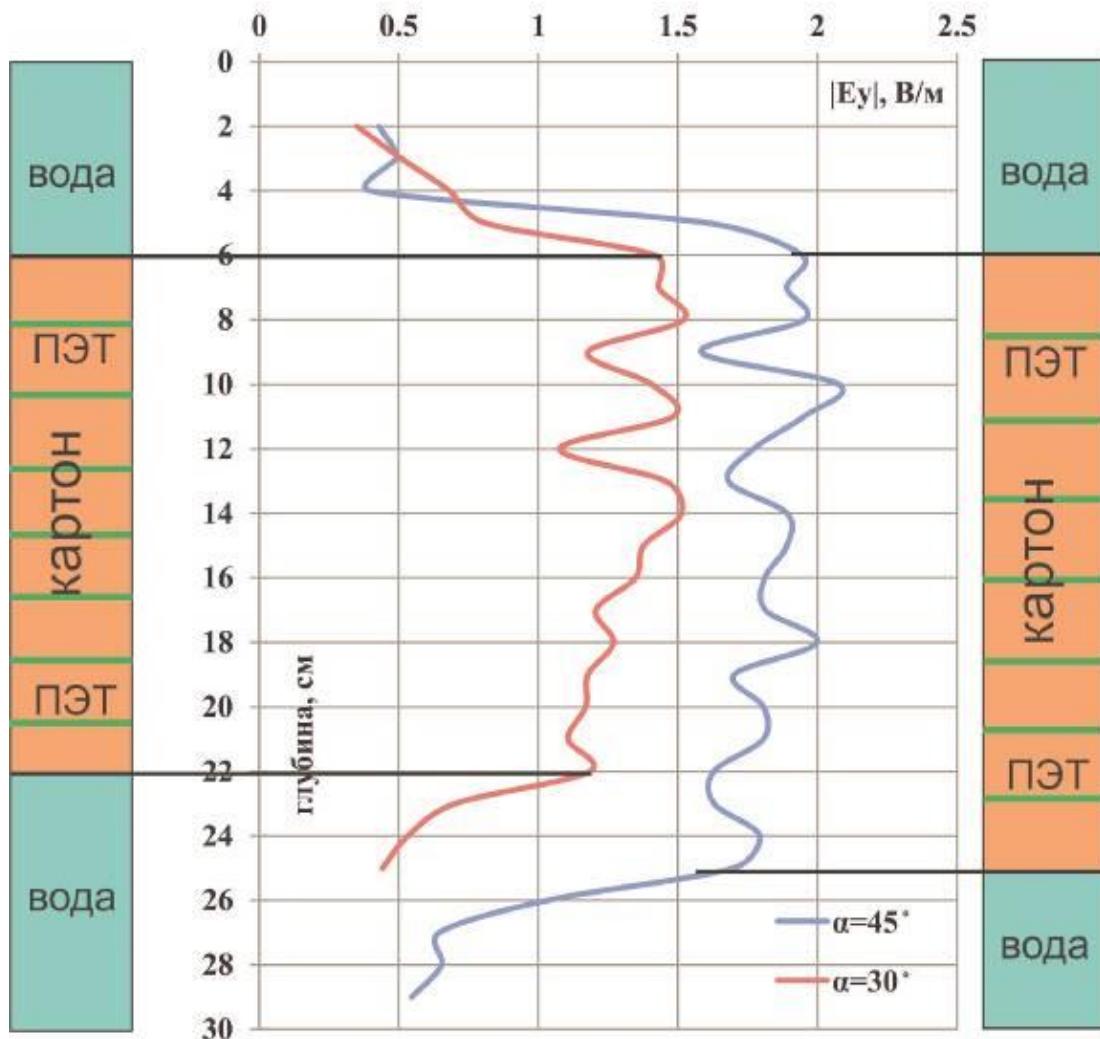


**Рис. 3.17.** Результаты физического моделирования при двух значениях угла  $\alpha$ .  
 Модель пласта – картон, прототип зонда ИО.095Г,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ, 45^\circ$

Отметим, что приведенные на рис. экспериментальные результаты, полученные для величины  $|E_y|$  при двух значениях угла  $\alpha$  между осью  $l$  расположенного в скважине зонда и осью анизотропии  $n$  в 3D модели пройденного скважиной пласта не противоречат результатам, полученным при математическом моделировании для более простой модели анизотропной среды. При сравнении результатов численных расчётов (рисунок 2.2, б) и данных физического моделирования (рисунок 3.17) мы видим, что увеличение угла  $\alpha$  ведёт к возрастанию величины  $|E_y|$ .

Показанные на рис. 3.18 кривые  $|E_y|$  против модели пройденного скважиной пласта с высоким коэффициентом  $\lambda$  были получены также при двух

значениях угла  $\alpha$  ( $30^\circ$  и  $45^\circ$ ). Модель такого пласта с высоким коэффициентом анизотропии состояла из чередующихся слоёв картона и полиэтилена.



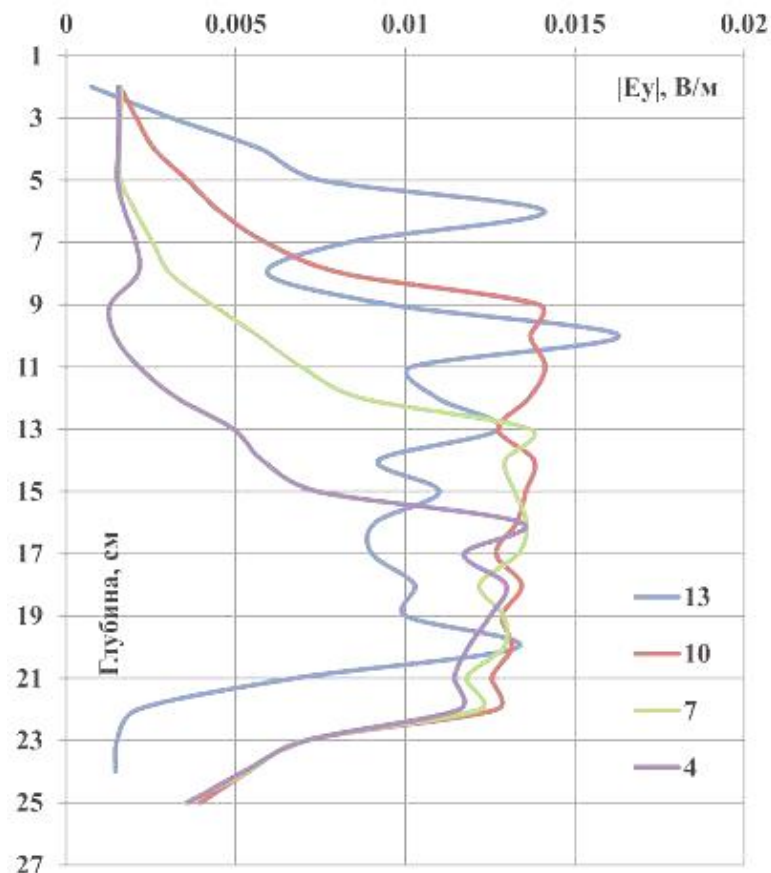
**Рис. 3.18.** Результаты физического моделирования при двух значениях угла  $\alpha$ .

Модель пласта – картон с ПЭТ, прототип зонда ИЮ.095Г,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  
 $\alpha=30^\circ, 45^\circ$

Как видно на рис. 3.18, осреднённые значения  $|E_y|$  против модели пласта при угле  $\alpha=45^\circ$  приблизительно в полтора раза больше, чем при  $\alpha=30^\circ$ . Эти данные, полученные при физических экспериментах для трёхмерной модели среды, согласуются с результатами численных расчётов для модели однородной анизотропной среды. Действительно, как видно на рис. 2.2,б, значения  $|E_y|$  при  $\alpha=45^\circ$  и  $\alpha=30^\circ$  (и одинаковых высоких значениях коэффициента анизотропии  $\lambda$ ) различаются приблизительно в полтора раза.

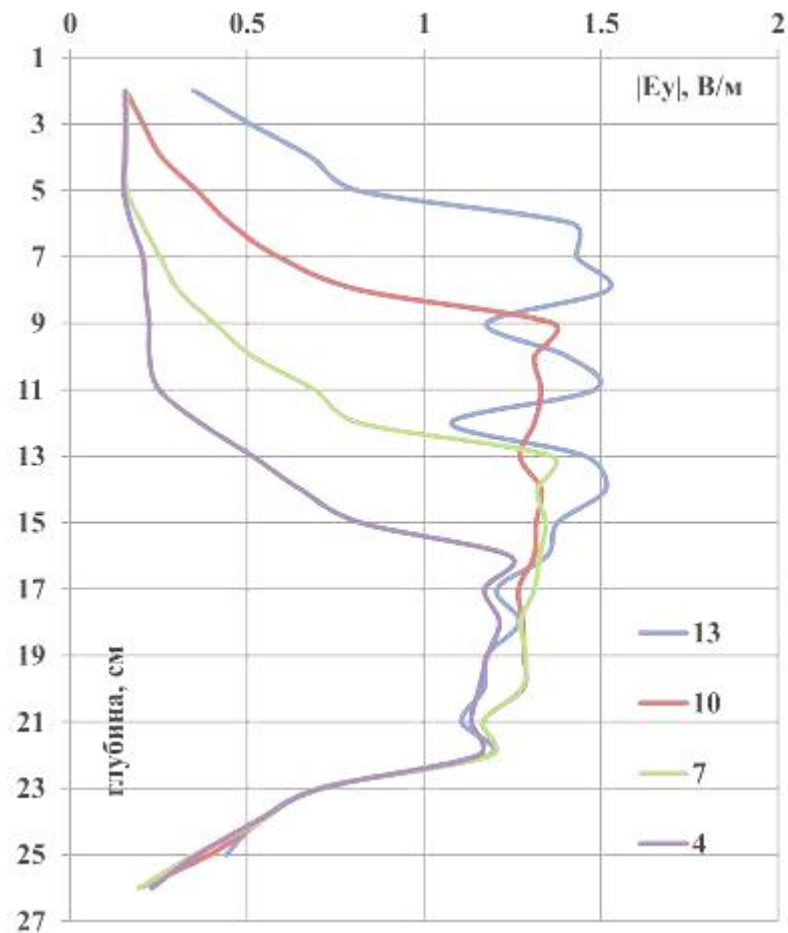
Разная ширина аномалий на рис. 3.17, 3.18 против модели пласта при разных значениях угла  $\alpha$  обусловлена следующим. Если  $\alpha$  – угол между осью скважины и нормалью к границам пласта (плоскопараллельного слоя) с истинной мощностью  $H$ , то видимая мощность пласта равна  $H/\cos(\alpha)$ . Поэтому (при острых углах  $\alpha$ ) чем больше угол  $\alpha$ , тем больше видимая мощность пласта. Для того, чтобы показать положение точки записи зонда относительно границ пласта при двух разных углах  $\alpha$  на рис. 3.17, 3.18 приведены две колонки. Слева показана колонка ("разрез" модели скважины) для угла  $\alpha=30^\circ$ , справа – для  $\alpha=45^\circ$ .

Две другие серии экспериментов были проведены при угле  $\alpha=30^\circ$  и при разных значениях мощности  $H$  моделей анизотропных пластов. Результаты, полученные при этих экспериментах, представлены на рис. 3.19, 3.20. Из-за того, что мощность анизотропного пласта для целей эксперимента многократно изменялась, колонки на рисунках 3.18, 3.19 не приведены.



**Рис. 3.19.** Результаты физического моделирования прототипа зонда ИЮ.095Г.

Модель пласта – картон,  $H=13$  см, 10 см, 7 см, 4 см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$



**Рис. 3.20.** Результаты физического моделирования прототипа зонда *ИО.095Г*.

Модель пласта – картон с ПЭТ,  $H=13$  см, 10 см, 7 см, 4 см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

На этих рисунках видно, что с возрастанием мощности  $H$  (и, соответственно, ростом равной  $H/\cos(\alpha)$  видимой мощности пласта) происходит пропорциональное ему увеличение ширины аномалии  $|E_y|$  против анизотропного пласта. Важно отметить следующее. Уменьшение мощности  $H$  пласта не оказывает большого влияния на осреднённое значение величины  $|E_y|$  против пласта даже в том случае, когда мощность  $H$  меньше длины зонда  $L$ . Как видно, например, на рис. 3.19, осреднённые значения  $|E_y|$  против пластов с мощностями  $H=4$  см,  $H=7$  см и  $H=10$  см - почти одинаковы и равны 0.013 В/м. При первом из указанных значений  $H$  мощность пласта - значительно меньше длины зонда  $L$ , равной 9.5 см.

Из этого следует, что предназначенный для определения коэффициента электрической анизотропии и имеющий оригинальную конструкцию зонд, с прототипом которого было проведено физическое моделирование, имеет

высокую разрешающую способность. По результатам измерений с зондом такой конструкции можно выделить в разрезе скважины анизотропные пласты (и, как будет показано ниже, определить их коэффициенты анизотропии) даже в том случае, когда мощности пластов меньше, чем длина зонда.

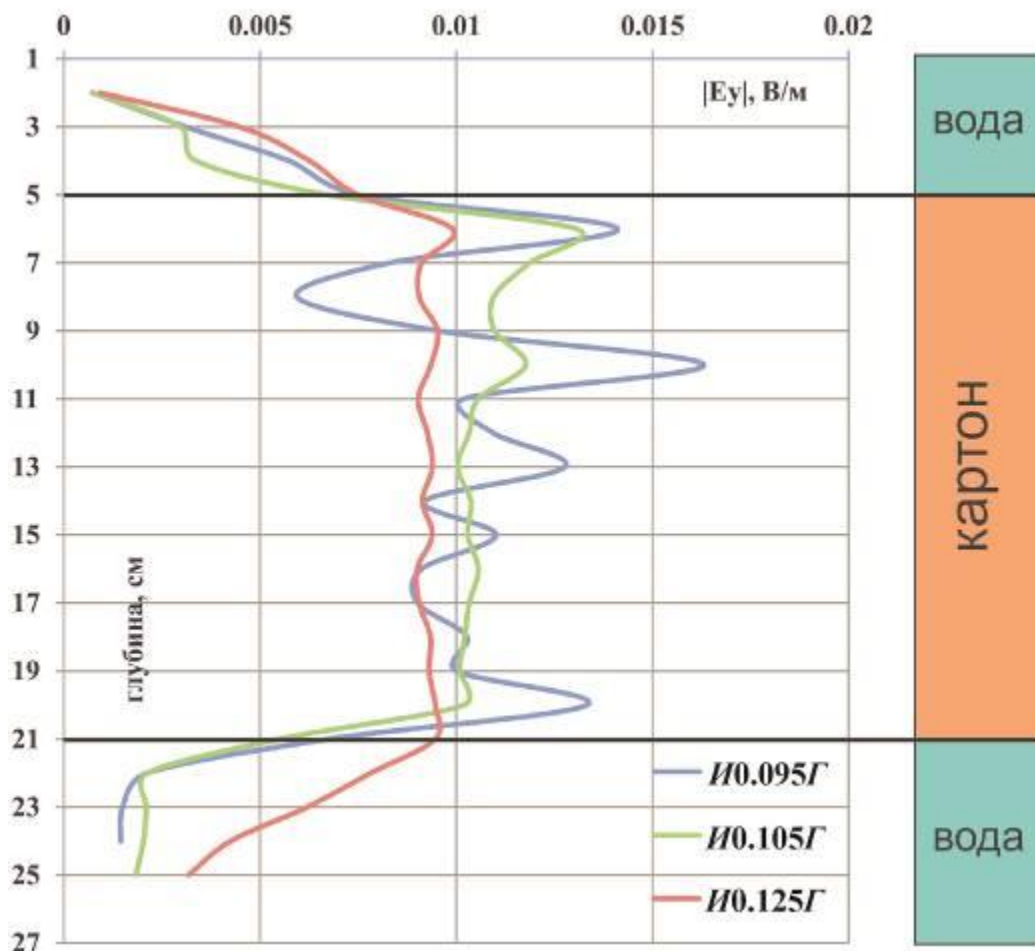
Высокую разрешающую способность зонда подобной конструкции, можно объяснить следующим. Генераторный переменный магнитный диполь  $G$  в этом зонде служит лишь для того, чтобы возбудить не зависящее от параметров среды первичное магнитное поле  $H^p$ . Переменное поле  $H^p$  по закону электромагнитной индукции создаёт (также не зависящее от среды) первичное электрическое поле  $E^p$ , которое равно нулю на оси магнитного диполя  $G$ . Электрическое поле индуцирует в анизотропных пластах и на границах пластов электрические заряды. При нахождении коротких измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$  в ближней зоне магнитного диполя  $G$  напряжения поля  $E$  в этих линиях - это напряжения поля индуцированных зарядов. Поэтому для результатов измерений с таким зондом не очень существенно то, где находится магнитный диполь  $G$  - против анизотропного пласта, или против вмещающей этот пласт среды.

При сравнении результатов моделирования на рис. 3.19 и 3.20 можем сделать выводы, аналогичные тем, что были приведены выше, при сравнении рис. 3.17 и 3.18. Значения  $|E_y|$  против имеющего очень высокое значение коэффициента анизотропии  $\lambda$  пласта из прослоев картона и полиэтиленовой плёнки (рис. 3.20) примерно на два порядка выше значений этой величины против пласта из слоёв картона, коэффициент анизотропии  $\lambda$  которого - лишь немного выше единицы (рис. 3.19).

Обратим ещё внимание на один из важных выводов, который можно сделать по материалам физических экспериментов. Приведенные на рис. 3.17, 3.19 результаты физического моделирования для моделей пласта из слоёв картона показали следующее. При помощи сконструированного прототипа зонда и применённой для уменьшения влияния помех методике измерений, удаётся не только выделять такие (ограниченные изотропной вмещающей

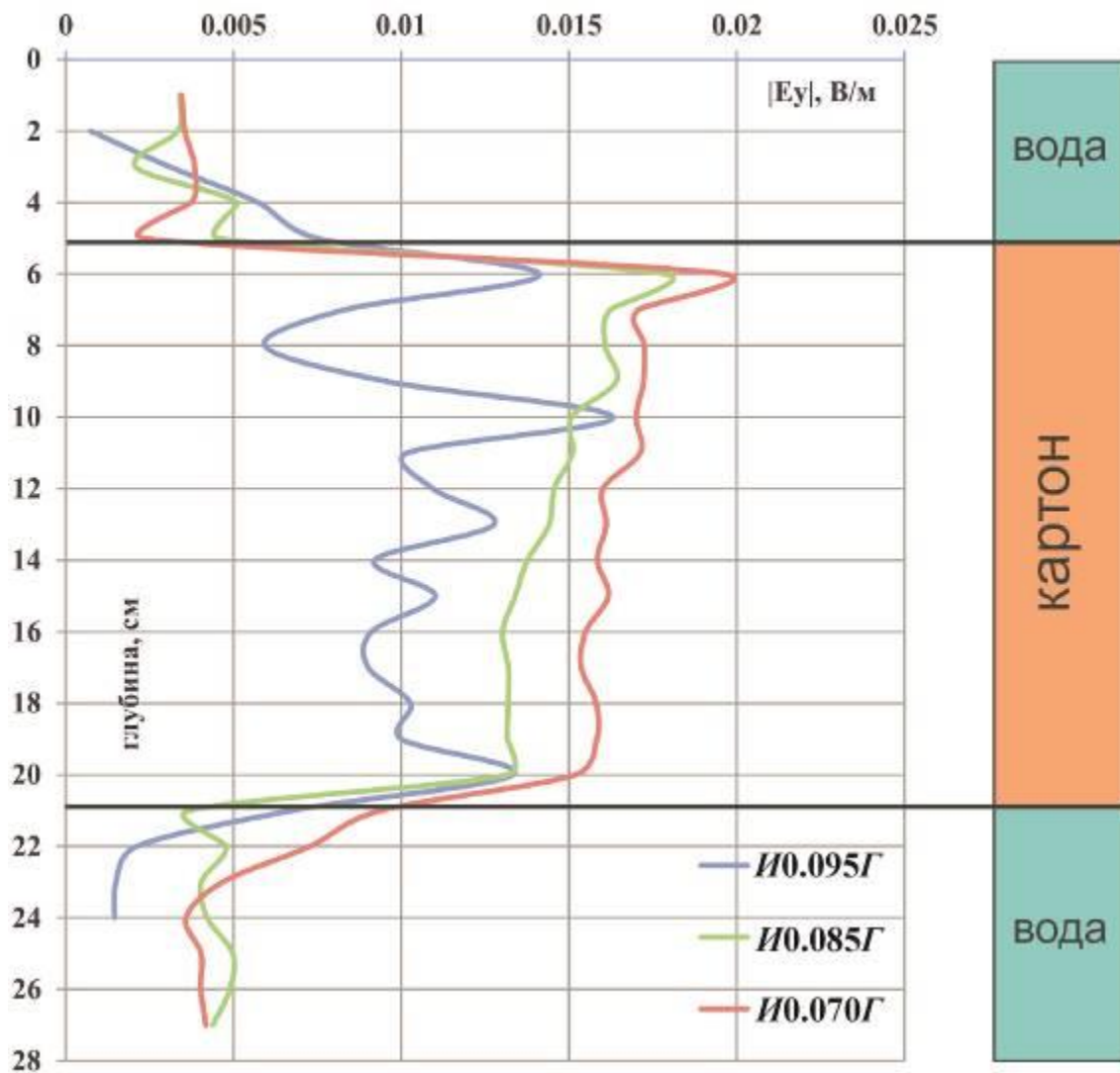
средой) пласты, но и оценить их коэффициенты анизотропии  $\lambda$ . Как будет показано в главе 4, среднее значение коэффициента  $\lambda$  моделей пластов, сконструированных из слоёв мебельного картона, может быть равно 1.005-1.020. То есть даже при столь близком к единице коэффициенте  $\lambda$  измерения с прототипом зонда дают возможность не только выявить интервалы анизотропных пластов с лишь немного превышающем единицу значением  $\lambda$ , но и определить коэффициент электрической анизотропии таких пород.

Еще один параметр, оказывающий влияние на результаты измерений при физическом моделировании – это длина  $L$  прототипа зонда, т.е. расстояние между центрами генераторного магнитного диполя и измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$ . На рис. 3.21, 3.22, показаны кривые, полученные для прототипов зондов разной длины  $L$ .



**Рис. 3.21.** Результаты физического моделирования прототипов зондов *ИО.095Г*, *ИО.105Г*, *ИО.125Г*.

Модель пласта – картон,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$



**Рис. 3.22.** Результаты физического моделирования прототипов зондов *ИО.095Г*, *ИО.085Г*, *ИО.070Г*.

Модель пласта – картон,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

При всех длинах  $L$  зондов против модели анизотропного пласта на рис. 3.21, 3.22 значения  $|E_y|$  - значительно выше, чем против изотропной вмещающей пласт среды. Можно также отметить, что при разных длинах  $L$  зонда форма кривых  $|E_y|$  по-разному осложнена локальными экстремумами. В первую очередь это относится к кривой, полученной с зондом *ИО.095Г*. Это связано с тем, что результаты измерений с этим зондом были получены в ходе первых серий экспериментов, когда модель пласта из картона не была ещё изменена под действием длительного нахождения в воде, как при проведенных позже измерениях с прототипами зондов разной длины.

На рис. 3.21, 3.22 видно, что осредненные значения величины  $|E_y|$  против модели пласта уменьшается с увеличением длины  $L$  зонда. Этот результат физического моделирования – вполне закономерен. Согласно выражениям (2.3), (2.5), полученным для модели однородной анизотропной среды, величина  $|E_y|$  обратно пропорциональна  $L^2$ , что мы и видим на рис. 3.21, 3.22.

И, наконец, ещё один вывод, который можно сделать при анализе результатов моделирования, показанных на этих рисунках. Представленные на рис. 3.21, 3.22 данные подтверждают ту закономерность, о которой было сказано при анализе рис. 3.19 и 3.20. На высокую "разрешающую способность" применённого при моделировании зонда его длина  $L$  не оказывает существенного влияния. Действительно, как видно на рис. 3.21, 3.22, изменение длины  $L$  зонда практически не влияет на точность, с которой может быть определено положение границ пласта.

По-видимому, необходимо, всё же, чтобы при проведении измерений в скважине, длина  $L$  зонда в несколько раз превышала диаметр  $d$  скважины. Следует отметить, что это условие было выполнено при проведении всех измерений с прототипом зонда в моделях пройденных скважиной анизотропных пластов. И, как показали результаты экспериментов, присутствие скважины в модели среды не сказывается существенным образом на особенностях влияния параметров анизотропного пласта на величину  $|E_y|$ . Это показало сравнение результатов физического моделирования с данными численных расчётов, полученных для таких моделей среды, в которых влияние скважины не учитывалось.

На приведенных выше рисунках видно, что результаты физического моделирования имеют различия не только из-за изменения условий эксперимента, но в разной степени осложнены влиянием помех. Описанные в разделе 3.3 применённые при конструировании лабораторных установок технические решения для уменьшения влияния электромагнитных помех позволили достичь существенного снижения влияния помех на результаты измерений. Однако следует отметить, что есть ещё одно (не связанное с



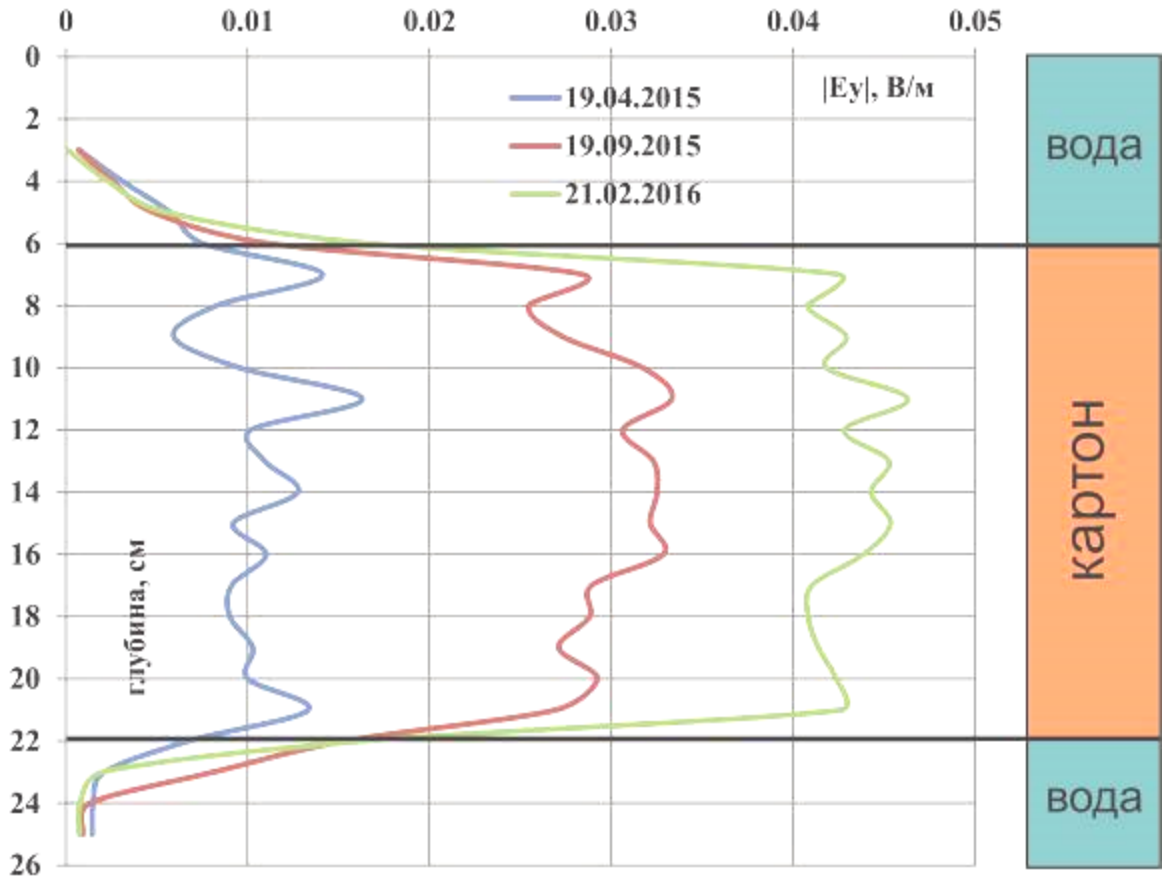
влиянием электромагнитных помех) обстоятельство, из-за которого кривые  $|E_y|$  против моделей пластов могут иметь осложнённую форму. Это проявляется в виде локальных максимумов и минимумов, что видно, например, на кривых  $|E_y|$ , показанных на рис. 3.19, 3.20 для зонда ИО.095Г.

Можно предположить, что такого рода осложнение формы кривых  $|E_y|$  связано с неравномерным (в первое время после конструирования модели среды) увлажнением слоёв картона и с изменением коэффициента анизотропии модели пласта из слоёв картона в зависимости от продолжительности нахождения такой модели в воде.

Была проведена серия из трёх экспериментов для одной и той же модели анизотропного пласта из картона. Разница во времени между первым и вторым измерениями, а также между вторым и третьим измерениями составляла 5 месяцев.

На рис. 3.23 показано то, как влияла длительность нахождения модели пласта из слоёв картона на кривые  $|E_y|$  против такой модели пласта. Как видно на этом рисунке, за длительный период времени значения  $|E_y|$  против пласта могут увеличиться в несколько раз. Иначе говоря, со временем значения  $|E_y|$  против пласта монотонно возрастали. О том, какое изменение коэффициента анизотропии  $\lambda$  соответствует такому увеличению величины  $|E_y|$ , будет сказано в разделе 4.2.

Полученные результаты режимных наблюдений, иллюстрирующими то, что в модели пласта из слоёв картона коэффициент анизотропии растёт с увеличением длительности нахождения такой модели в воде, согласуется с полученными ранее М. Д. Кауркиным результатами экспериментов для подобной модели пласта [43]. На рис. 3.24 показано, что происходит с мебельным картоном при длительном нахождении в воде, он приобретает слоистую текстуру, типичную для некоторых анизотропных сред. Поэтому коэффициент анизотропии такой модели анизотропного пласта возрастает с увеличением времени нахождения такой модели в воде.



**Рис 3.23.** Результаты физического моделирования прототипа зонда ИО.095Г.

Модель пласта – картон,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$ . Измерения - с интервалами около 5-и месяцев



**Рис 3.24.** Фрагмент модели пласта из картона после продолжительного пребывания в воде

## Выводы

1. Для проведения экспериментальных исследований сконструированы оригинальные лабораторные установки. Они включают прототип имеющего оригинальную конструкцию зонда и модели пройденных скважиной анизотропных пластов из слоёв картона, либо чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки. Скважину и вмещающую пласт изотропную среду имитировала водопроводная вода.

2. Для уменьшения влияния электромагнитных помех на результаты измерений были опробованы различные подходы при конструировании прототипа зонда. В частности, уменьшению влияния помех способствовало применение при моделировании зонда с двумя взаимно ортогональными измерительными линиями.

3. При физическом моделировании подтверждены сделанные ранее на основе анализа математических выражений выводы о том, что обусловленная анизотропией среды компонента электрического поля пропорциональна частоте  $f$  (рис. 3.16, 3.17), то, какое влияние на эту компоненту оказывает угол  $\alpha$  между осью зонда  $l$  и осью анизотропии  $n$  (рис. 3.18, 3.19), а также другие факторы.

4. Впервые проведено физическое моделирование прототипа нового зонда электромагнитного каротажа. Результаты моделирования показали, что измерения с ним позволяют выделять в разрезе модели скважины анизотропные пласты даже в том случае, когда коэффициент анизотропии  $\lambda$  лишь немного превышает единицу (рис. 3.13, 3.15, 3.17), а также и в тех случаях, когда мощность пласта - меньше длины зонда (рис. 3.20, 3.21).

## ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АНИЗОТРОПИИ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 4.1. Методика определения коэффициента анизотропии по экспериментальным данным

В соответствии с выражением (2.3) в ближней зоне (при  $|k_t| \cdot L \ll 1$ ) составляющая  $\text{Im}E_y$  в точке *И* на оси магнитного диполя на расстоянии *L* от центра диполя зависит лишь от одного электрического параметра среды – коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$ . Этим можно воспользоваться для определения параметра  $\lambda$  при известной величине  $\text{Im}E_y$ . Кроме того, как было показано в главе 2, согласно (2.5), в ближней зоне  $|E_y| \approx |\text{Im}E_y|$ , где  $|E_y|$  и  $|\text{Im}E_y|$  – амплитуды компоненты  $E_y$  и её активной составляющей  $\text{Im}E_y$ . Это позволило не проводить при физическом моделировании раздельное измерение активной и реактивной составляющих компоненты  $E_y$ .

На рис. 2.2,а была показана номограмма для определения коэффициента анизотропии по значениям  $|\text{Im}E_y|$  и угла  $\alpha$  для зонда длиной *L*, равной 1 м, при частоте  $f=10$  кГц. Эта номограмма была получена на основе расчётов для модели однородной анизотропной среды по выражениям (2.1) а не по приближённому равенству (2.3). Значения  $|\text{Im}E_y|$  на этой номограмме нормированы на первичное магнитное поле  $H^{\text{П}}$ . На оси *l* магнитного диполя в точке *И*  $H^{\text{П}}=M/(2\pi L^3)$ . Зависимости  $|\text{Im}E_y|/H^{\text{П}}$  от  $\alpha$ , приведенные для двух значений параметра  $\rho_t$  (2 Ом·м и 200 Ом·м), практически совпадают. Это обусловлено следующим. При указанных на рис. 2.2,а величинах  $f$ ,  $L$  имеем  $|k_t|L \approx 0.2 \ll 1$  при  $\rho_t=2$  Ом·м и  $|k_t|L \approx 0.02 \ll 1$  при  $\rho_t=200$  Ом·м, то есть точка *И* находится в ближней зоне генераторного магнитного диполя. В этом случае, согласно выражениям (2.3), (2.5), значения  $|\text{Im}E_y|$ , а также и  $|E_y| \approx |\text{Im}E_y|$  не зависят от параметров  $\rho_t$ ,  $\rho_n$ .

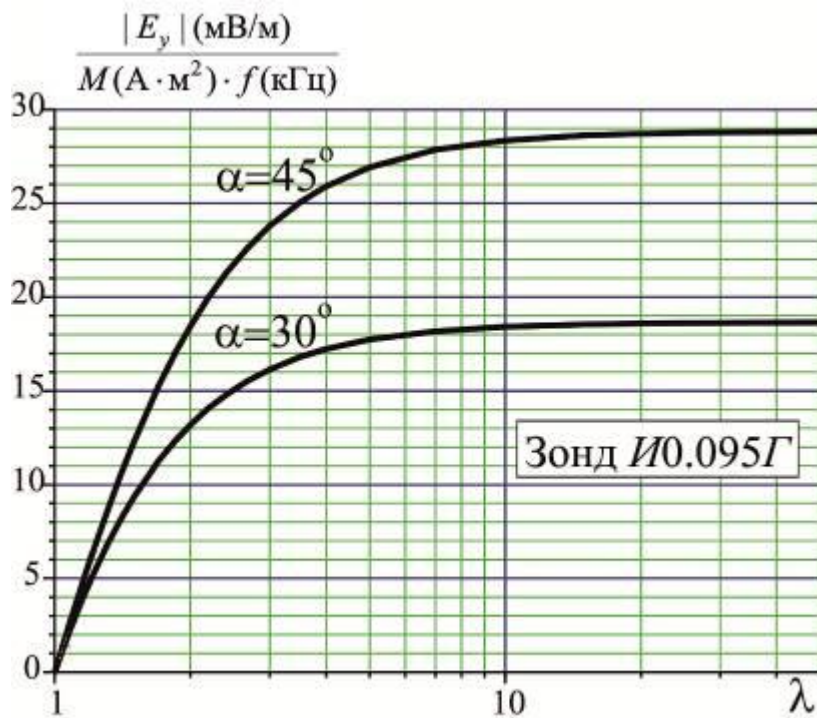
На рис. 2.2,*а* видно, что при  $\alpha=0^\circ$  и при  $\alpha=90^\circ$  компонента  $\text{Im}E_y=0$ . Благоприятным условием для определения  $\lambda$  по этой компоненте являются то, когда значения угла  $\alpha \geq 10^\circ - 15^\circ$  и  $\alpha \leq 85^\circ$ .

На рис. 2.2,*б* приведены зависимости  $|\text{Im}E_y|/H^\Pi$  от коэффициента анизотропии  $\lambda$  при двух значениях угла  $\alpha$ . Важно отметить, что при характерных для большинства анизотропных горных пород невысоких значениях коэффициента анизотропии ( $\lambda < 3-4$ ) величина  $|\text{Im}E_y|$  имеет относительно высокую "чувствительность" к изменению  $\lambda$ . При не характерных для горных пород, аномально высоких значениях  $\lambda$  величина  $|\text{Im}E_y|$  лишь незначительно меняется с изменением  $\lambda$ . Результаты расчётов показали, в частности, что при фиксированных значениях  $M$ ,  $L$ ,  $\alpha$  и изменении  $\lambda$  от 10-20 до 1000 величины  $|\text{Im}E_y|$  и  $|E_y|$  практически не меняются. То, как этим можно было воспользоваться для определения момента  $M$  генераторного магнитного диполя, будет показано ниже.

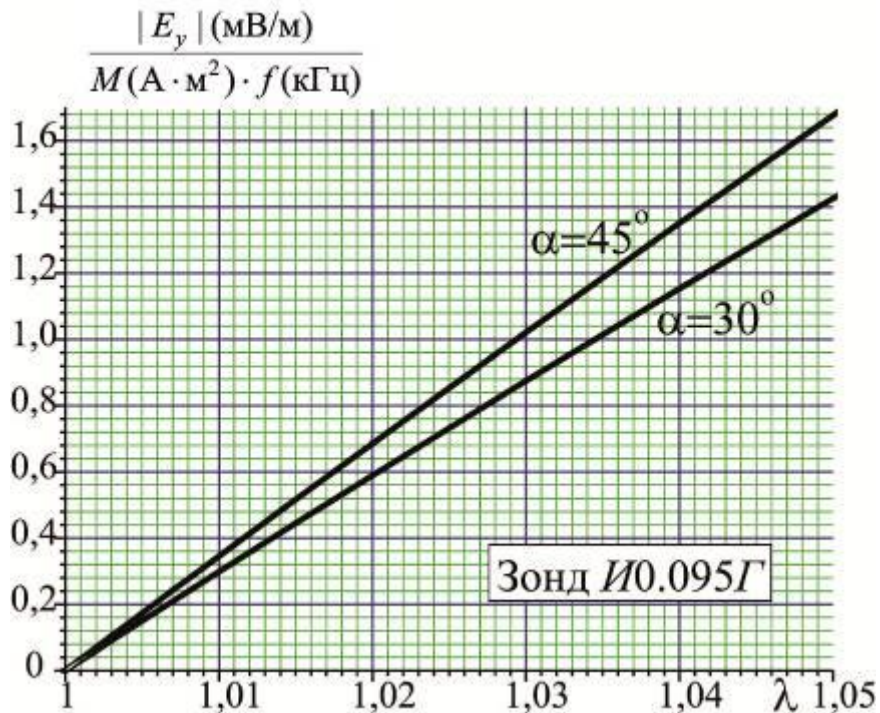
Приведенная на рис. 2.2,*а* номограмма получена при фиксированных значениях момента  $M$  магнитного диполя, частоты  $f=\omega/(2\pi)$  и длины  $L$  зонда. Но из выражений (2.3), (2.5) следует, что величины  $|\text{Im}E_y|$  и  $|E_y|$  пропорциональны отношению  $\frac{M \cdot \omega}{L^2}$  или  $\frac{M \cdot f}{L^2}$ . Поэтому для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по величинам  $|E_y|$  и угла  $\alpha$  при известных значениях  $M$ ,  $f$ ,  $L$  можно воспользоваться "универсальной" номограммой. Это возможно, конечно, в том случае, когда справедливо неравенство  $|k_i| \cdot L \ll 1$ .

Так как физическое моделирование было проведено при двух значениях угла  $\alpha$  ( $\alpha=30^\circ$  и  $\alpha=45^\circ$ ), то такая, приведенная на рис. 4.1 номограмма, имеет тот же вид, что на рис. 2.2,*б*. Но, в отличие от рис. 2.2,*б*, где  $L=1$  м, а по вертикальной оси показаны значения  $|\text{Im}E_y|/H^\Pi$ , на рис. 4.1  $L=95$  мм = 0.095 м, а по вертикальной оси отложены значения отношения  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$ , где размерности  $[|E_y|]=\text{мВ/м}$ ,  $[M]=\text{А} \cdot \text{м}^2$ ,  $[f]=\text{кГц}$ . Это и делает номограмму на рис. 4.1 более универсальной и простой в применении при определении коэффициента

анизотропии  $\lambda$  по результатам физического моделирования. На рис. 4.2 приведена номограмма для определения значений коэффициента  $\lambda$  не намного превышающих единицу.



**Рис. 4.1.** Номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значениям  $|E_y|$



**Рис. 4.2.** Номограмма для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$ , незначительно превышающего единицу, по значениям  $|E_y|$

## 4.2. Примеры определения коэффициента анизотропии по данным физического моделирования

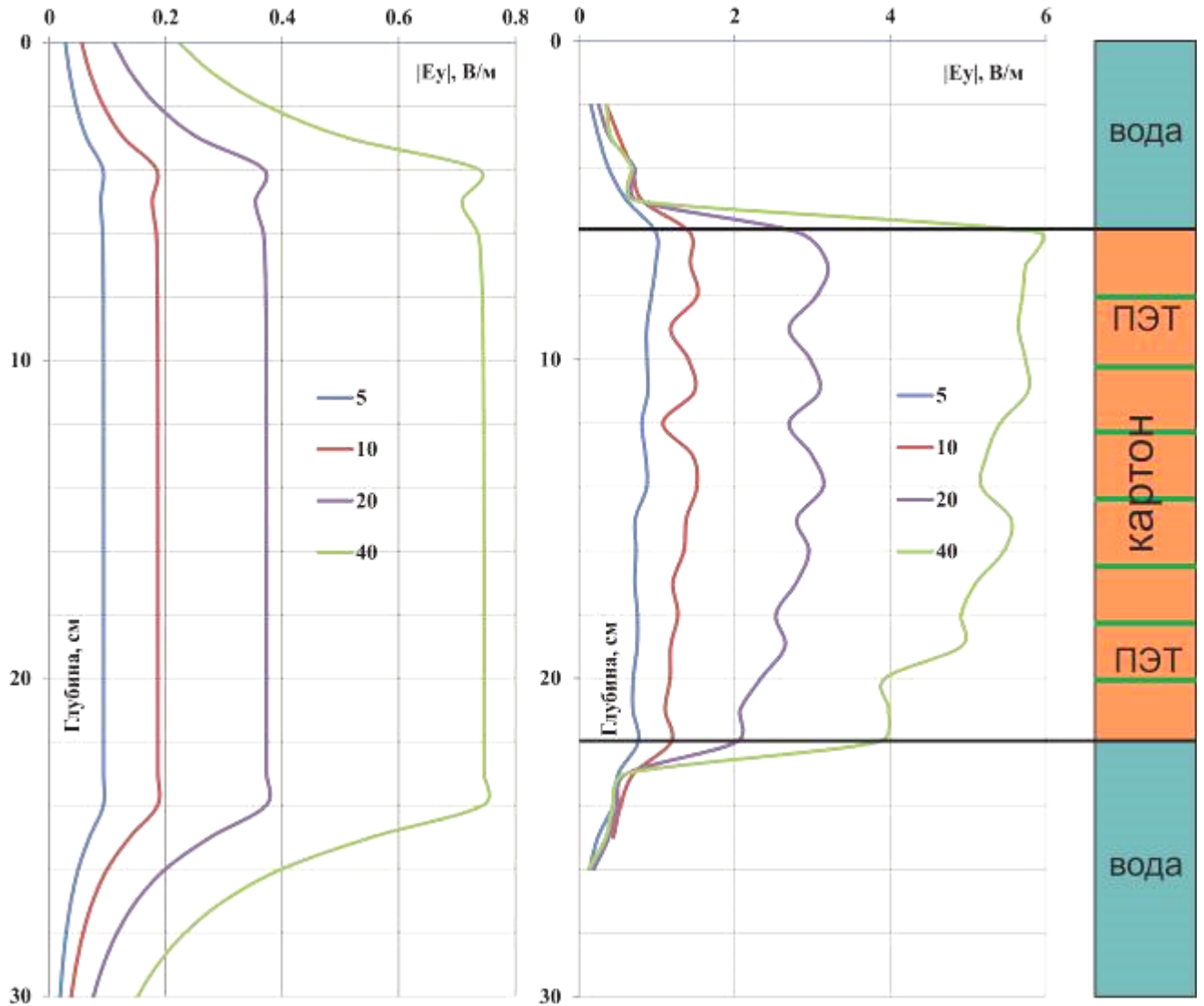
Для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значению  $|E_y|$  нужно знать величину магнитного момента генераторной катушки (амплитуду  $M$  момента переменного магнитного диполя), так как в соответствии с выражениями (2.3), (2.5) величина  $|E_y|$  пропорциональна  $M$ . Для определения величины  $M$  было применено два следующих подхода.

Первый подход основан на том, что генераторная катушка, изготовленная для прототипа зонда, имеет известные геометрические характеристики – число витков  $n$ , площадь одного витка  $S$ , магнитная проницаемость сердечника  $\mu$ , ток  $I$ , подаваемый в генераторную катушку. С помощью приведенной, например, в книге [74] формулы:  $M = S \cdot n \cdot \mu \cdot I$ , подставляя соответствующие значения  $n=34$ ,  $S=0.000254 \text{ м}^2$ ,  $\mu=400$ ,  $I=2 \text{ А}$ , получаем:  $M=7.7 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ .

Второй подход, примененный для определения магнитного момента  $M$ , был основан на сравнении данных физического и математического моделирования (при величине  $M$ , равной  $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ). Величина  $M$  была определена при сопоставлении результатов физического и математического моделирования для модели пласта с аномально – высоким значением коэффициента анизотропии  $\lambda$ . Как видно на рис. 2.2,б и рис. 4.1, при очень высоком коэффициенте анизотропии  $\lambda$  и фиксированных значениях угла  $\alpha$  величина  $|E_y|$  практически не меняется при изменении  $\lambda$ . Это и позволило определить магнитный момент  $M$ .

На рис. 4.3 показаны расчётные и экспериментальные кривые  $|E_y|$  для прототипа зонда *ИО.095Г*, полученные при разных частотах  $f$  (5 кГц, 10 кГц, 20 кГц, 40 кГц) против модели анизотропного пласта мощностью 13 см. Расчетные кривые получены при значении  $M$ , равном  $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Модель пласта с высоким значением  $\lambda$  сконструирована из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки. Оценки, сделанные на основе выражений, приведенных в работе [15], показали, что у такой модели пласта коэффициент анизотропии  $\lambda \approx 50$ . Поэтому численные расчёты, результаты которых

приведены на рис. 4.3, были выполнены для модели анизотропного пласта при  $\lambda=50$ . В связи со сказанным выше, даже в том случае, если оценка величины коэффициента  $\lambda$  была сделана с большой погрешностью, это не оказало бы существенного влияния на результаты моделирования.



**Рис. 4.3.** Расчётные и экспериментальные кривые  $|E_y|$  при разных частотах  $f$  против пласта с высоким значением коэффициента  $\lambda$

При сравнении полученных при одинаковых частотах  $f$  расчётных значений  $|E_y|$  и осреднённых экспериментальных значений  $|E_y|$  против модели пласта были определены следующие значения магнитного момента  $M$  генераторного магнитного диполя в прототипе зонда:  $8.0 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ ,  $7.5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ ,  $7.7 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ ,  $7.5 \text{ A}\cdot\text{m}^2$ . Беря среднее из этих значений, мы определили, что у



генераторного магнитного диполя магнитный момент  $M=(7.6 - 7.7) \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Такое значение  $M$  практически совпадает с тем, которое было получено на основе выражения  $M = S \cdot n \cdot \mu \cdot I$ . Это свидетельствует о том, что результаты определения величины  $M$  являются достоверными.

После того, как было определено значение магнитного момента  $M$ , мы получили возможность опробовать методику определения коэффициента анизотропии по экспериментальным данным, полученным для моделей пластов с невысоким значением коэффициента анизотропии. Для определения коэффициента  $\lambda$  таких пластов мы пользовались номограммой, показанной на рис. 4.4. Номограмма получена на основе расчётов для модели однородной анизотропной среды по формуле (2.1). Как и на рис. 4.1, на горизонтальной оси рис. 4.4 показаны значения (подлежащего определению) коэффициента  $\lambda$ ; по

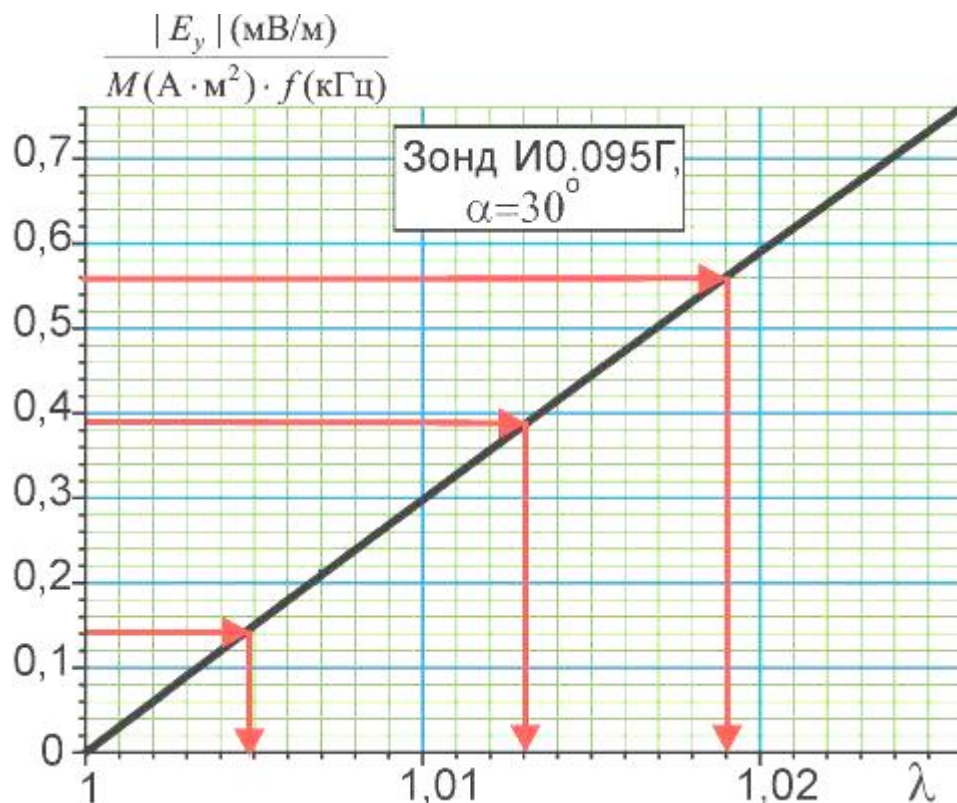
вертикальной оси - значения отношения  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$  ( $|E_y|$  - в мВ/м,  $M$  - в  $\text{А}\cdot\text{м}^2$ ,  $f$  - в кГц). Значение  $M$  было принято равным  $7.7 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Приведём примеры определения коэффициента анизотропии  $\lambda$ .

На рис. 3.23 были приведены три кривые  $|E_y|$  (для зонда *ИО.095Г* при угле  $\alpha=30^\circ$ ) против модели пройденного скважиной "слабоанизотропного" пласта из слоёв картона при разной длительности нахождения такой модели пласта в пресной воде. Время, прошедшее между вторым и первым измерениями, а также - между третьим и вторым измерениями, было равно приблизительно пяти месяцам. Для этих трёх кривых были определены следующие средние значения величины  $|E_y|$  против модели пласта:  $0.011 \text{ В/м} = 11 \text{ мВ/м}$ ,  $0.030 \text{ В/м} = 30 \text{ мВ/м}$  и  $0.043 \text{ В/м} = 43 \text{ мВ/м}$ . При магнитном моменте  $M$  генераторного магнитного диполя, равном  $7.7 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ , и частоте  $f=10 \text{ кГц}$  произведение  $M(\text{А}\cdot\text{м}^2) \cdot f(\text{кГц})$  численно равно 77. При приведенных выше 3-х величинах

$|E_y|$  для отношений  $\frac{|E_y|(\text{мВ/м})}{M(\text{А}\cdot\text{м}^2) \cdot f(\text{кГц})}$  получаем следующие численные

значения: 0.14, 0.39, 0.56. По ним, пользуясь приведенной на рис. рис. 4.4 номограммой, определяем три (соответствующие трем разным по времени

измерениям) значения коэффициента электрической анизотропии модели пласта из слоёв картона:  $\lambda=1.005$ ,  $\lambda=1.013$ ,  $\lambda=1.019$ . Эти результаты интерпретации данных физического моделирования показывают, что по результатам измерений с применённым прототипом нового зонда электромагнитного каротажа коэффициент анизотропии  $\lambda$  пройденного скважиной пласта (при остром угле  $\alpha$ ) может быть определён даже в том случае, когда величина  $\lambda$  больше значения  $\lambda=1$  (изотропная среда) на первые проценты и даже - десятые доли процента.

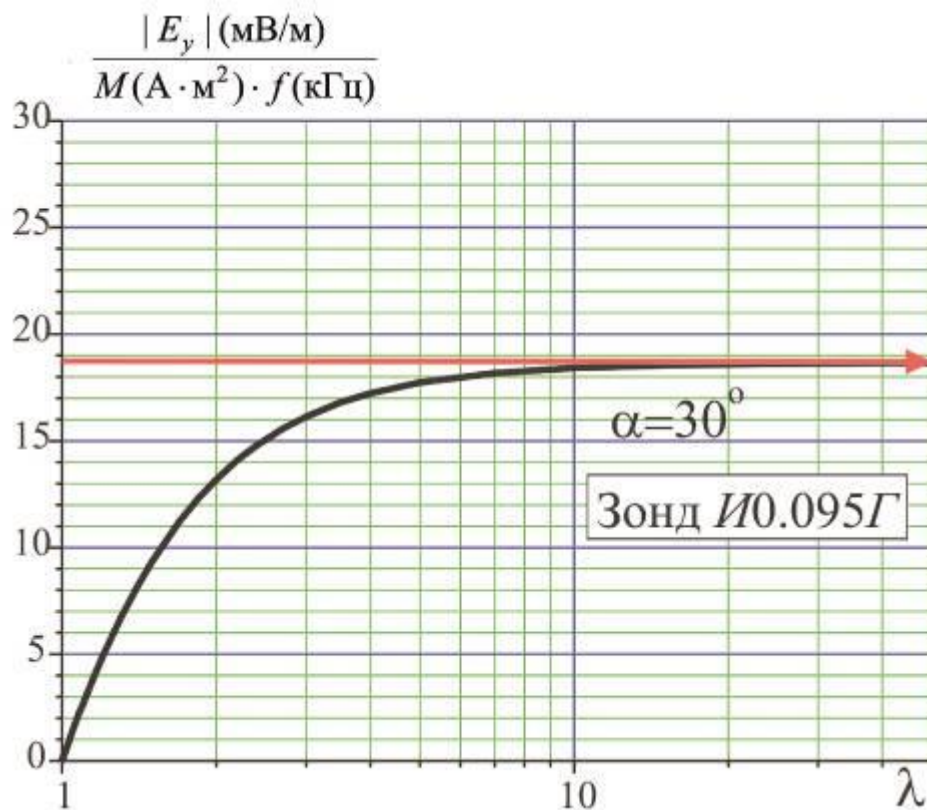


**Рис. 4.4.** Примеры определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  модели пласта из слоёв картона по значениям  $|E_y|$

Но у анизотропных горных пород коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$  может иметь более высокие значения, чем те, приведенные выше величины  $\lambda$ , которые, согласно полученным результатам интерпретации, имели применённые при физических экспериментах модели анизотропного пласта из слоёв картона. Вместе с тем, для горных не характерны столь высокие значения  $\lambda$  (50 или более), которые, согласно сделанным оценкам, были присущи

применённым при экспериментах моделям анизотропных пластов из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки.

Действительно, в главе 3 на рис. 3.13 была приведена кривая  $|E_y|$  (для зонда И0.095Г при угле  $\alpha=30^\circ$ ) против модели пласта из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки. Для этой кривой было определено осреднённое значение  $|E_y|$  против пласта и отношение  $\frac{|E_y| \text{ (мВ/м)}}{M \text{ (А} \cdot \text{м}^2) \cdot f \text{ (кГц)}}$ , численно равное 18.8. Как видно на рис. 4.5, при такой величине этого отношения было невозможно определить значение коэффициента анизотропии  $\lambda$ . Можно было лишь оценить то, что этот коэффициент - не меньше десяти единиц. Как уже было показано выше (рис. 2.2,б и др.), при аномально высоких значениях  $\lambda$  величина  $|E_y|$  практически не меняется при изменении коэффициента  $\lambda$ . Низкая чувствительность величины  $|E_y|$  к изменению  $\lambda$  при очень высоких значениях  $\lambda$  видна и на рис. 4.5.



**Рис. 4.5.** "Попытка" определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  модели пласта из картона с ПЭТ по результатам физического моделирования

Для того, чтобы получить результаты моделирования и опробовать методику определения коэффициента анизотропии для пласта со значением  $\lambda$  в несколько единиц, были сделаны изменения в модели пласта из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой плёнки. Эти изменения состояли в следующем.

С целью уменьшения величины коэффициента анизотропии модели пласта в прослоях полиэтиленовой пленки были проделаны отверстия по методике, описанной в разделе 3.1. Сначала такие отверстия были проделаны с "плотностью" 100 отверстий на квадратный метр. Результаты экспериментов для такой модели пласта приведены на рис. 4.6. Было определено среднее значение  $|E_y|$  против пласта, равное 1.42 В/м, и (при  $M=7.7 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ) отношение  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$ , равное  $18.4 \frac{\text{мВ/м}}{\text{А}\cdot\text{м}^2 \cdot \text{кГц}}$ , которое немного меньше того значения, которое было определено для модели пласта при отсутствии отверстий в полиэтиленовой плёнке.

Как видно на рис. 4.7, при указанной выше "плотности" отверстий в полиэтиленовой плёнке (как и при отсутствии таких отверстий) коэффициент анизотропии модели пласта имеет аномально высокое значение. По приведенным на этом рисунке данным можно лишь приблизительно оценить то, что коэффициент  $\lambda$  модели пласта может быть равен 10-20 единицам.

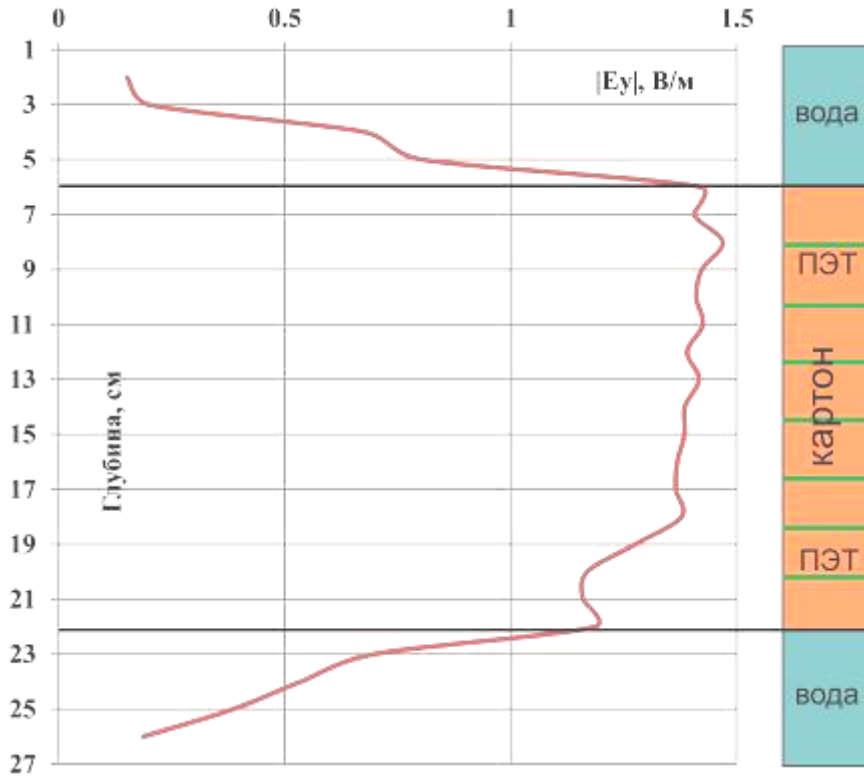


Рис. 4.6. Кривая  $|E_y|$  против модели пласта из картона с ПЭТ (100 отв./м<sup>2</sup>).

$H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

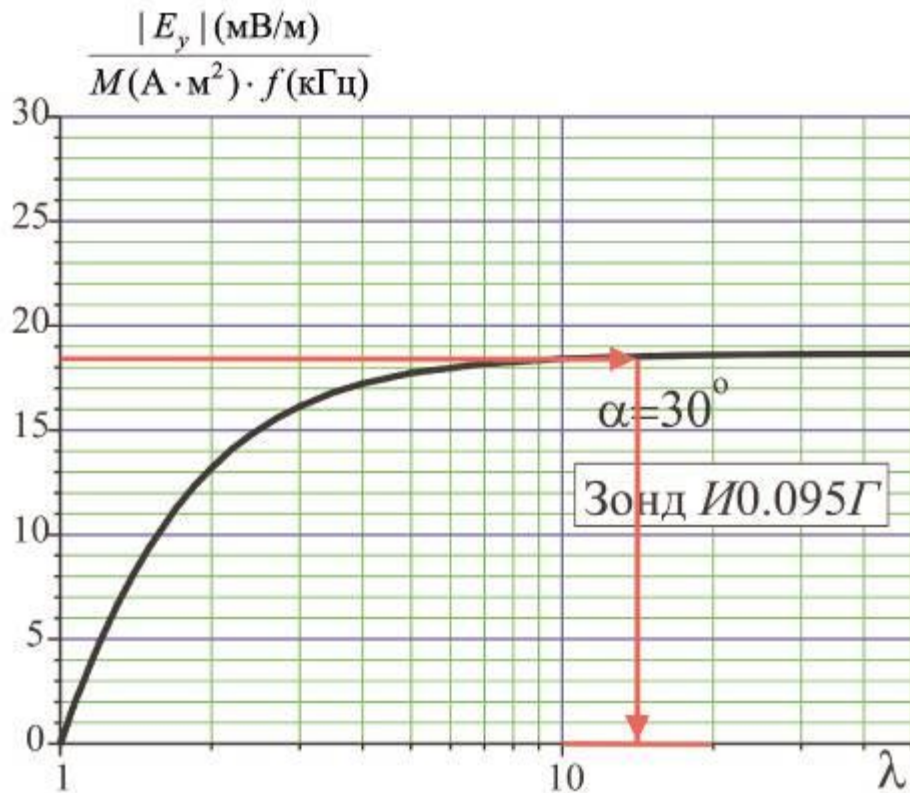
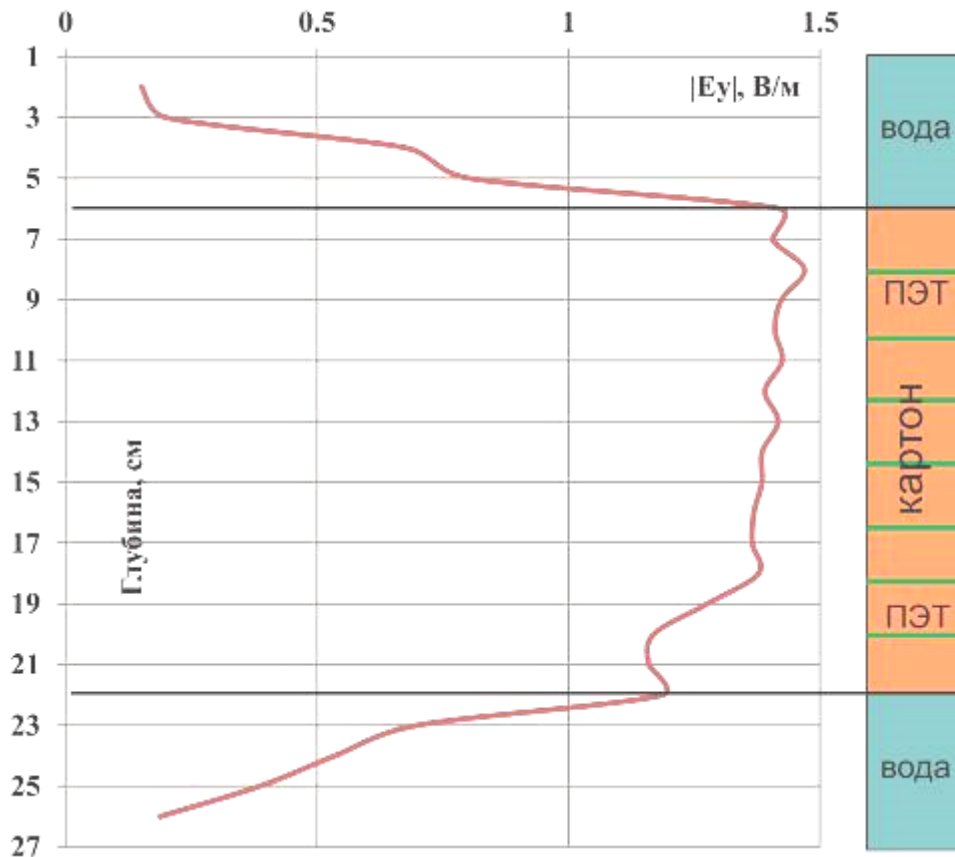


Рис. 4.7. Определение коэффициента анизотропии  $\lambda$  модели пласта из картона с ПЭТ (100 отв./м<sup>2</sup>) по значениям  $|E_y|$

Для проведения следующего эксперимента с целью уменьшения значения коэффициента анизотропии модели пласта было принято решение увеличить число отверстий в прослоях из полиэтиленовой плёнки. Это число было увеличено вдвое - до двухсот отверстий на квадратный метр. Кривая  $|E_y|$  (для прототипа зонда ИО.095Г при угле  $\alpha=30^\circ$  и частоте  $f=10$  кГц) против такой модели пласта приведена на рис. 4.8.



**Рис. 4.8.** Кривая  $|E_y|$  против модели пласта из картона с ПЭТ (200 отв./м<sup>2</sup>).

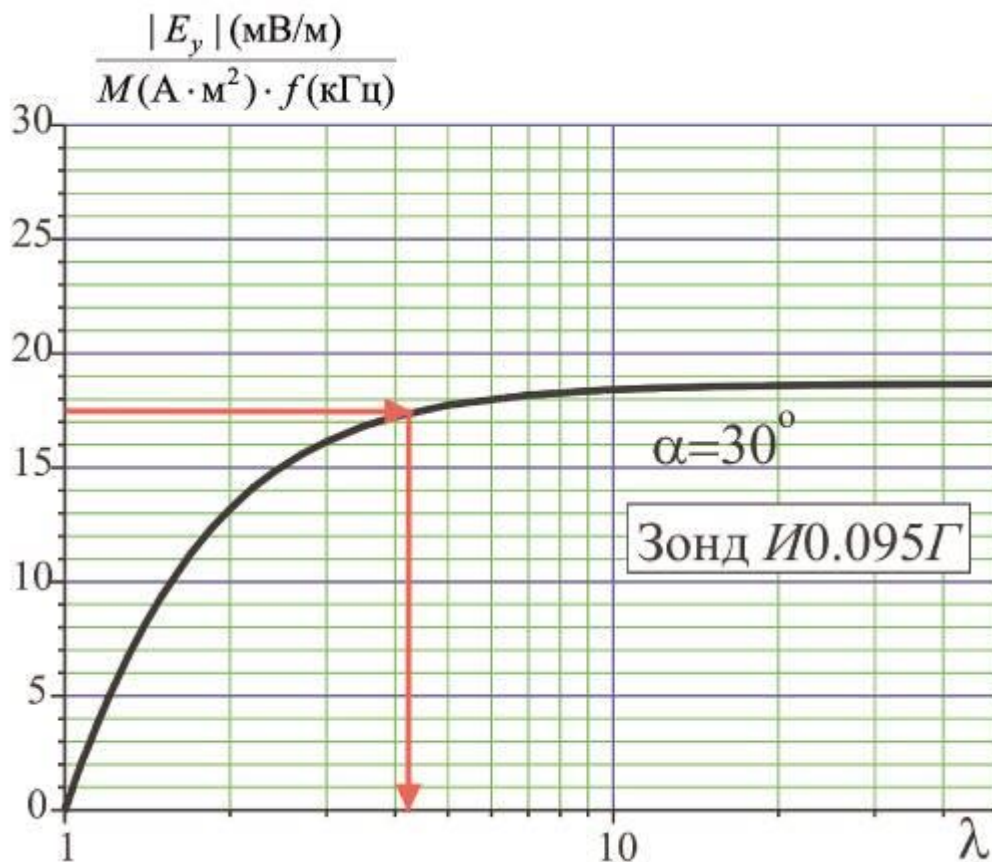
$H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

На основе результатов этого физического моделирования было определено следующее осреднённое значение величины  $|E_y|$  против модели пласта:  $|E_y|=1.34$  В/м. Этому значению  $|E_y|$  при величине момента  $M=7.7$  А·м<sup>2</sup> и частоте  $f=10$  кГц соответствует следующая величина отношения  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}=17.4$

$\frac{\text{мВ/м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кГц}}$ . Как видно на рис. 4.9, такой величине  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$  для зонда ИО.095Г

соответствует значению  $\lambda$  модели анизотропного пласта, равное приблизительно 4.2.

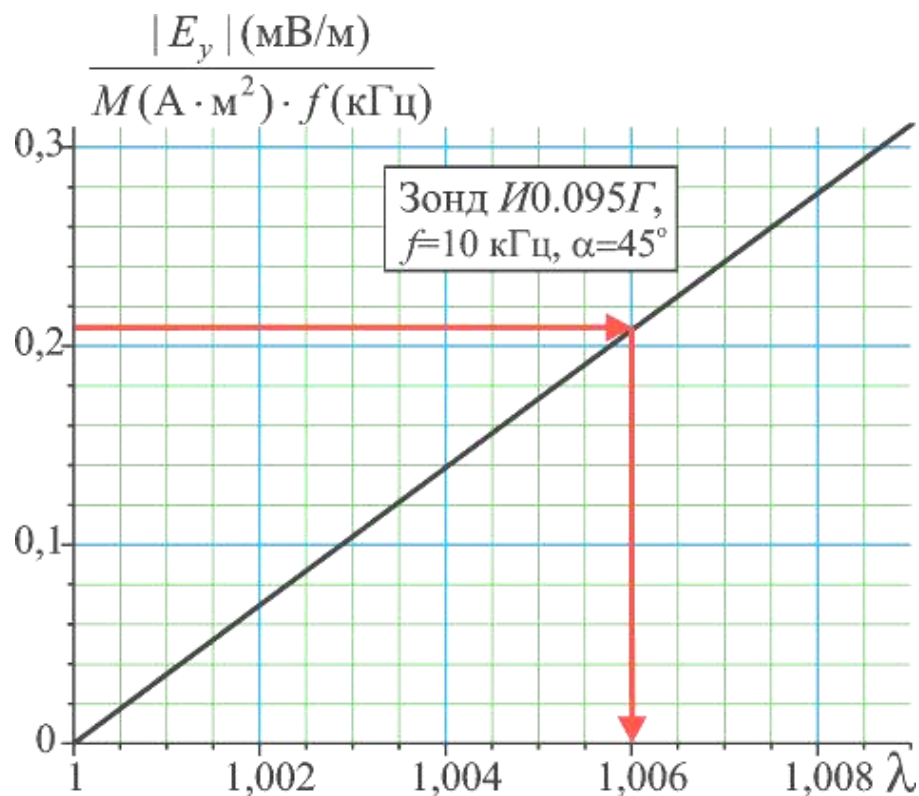
Итак, как показано на рис. 3.22, 4.4, рис. 4.8, 4.9 и других рисунках, при применённых для физического моделирования прототипе зонда электромагнитного каротажа и методике определения коэффициентов анизотропии  $\lambda$  пластов, мы можем (при острых углах  $\alpha$ ) определять коэффициенты электрической анизотропии пройденных проводящей скважиной пластов при тех пределах изменения  $\lambda$ , которые могут быть присущи анизотропным горным породам. Для определения коэффициента анизотропии минимальные значения  $\lambda$  могут превышать единицу лишь на десятые доли процента, а максимальные значения  $\lambda$  могут быть равны нескольким единицам. Важно отметить, что эти пределы изменения  $\lambda$  – наиболее типичны для возможных значений коэффициента  $\lambda$  анизотропных горных пород.



**Рис. 4.9.** Определение коэффициента анизотропии модели пласта из картона с ПЭТ (200 отв./м<sup>2</sup>) по значениям  $|E_y|$

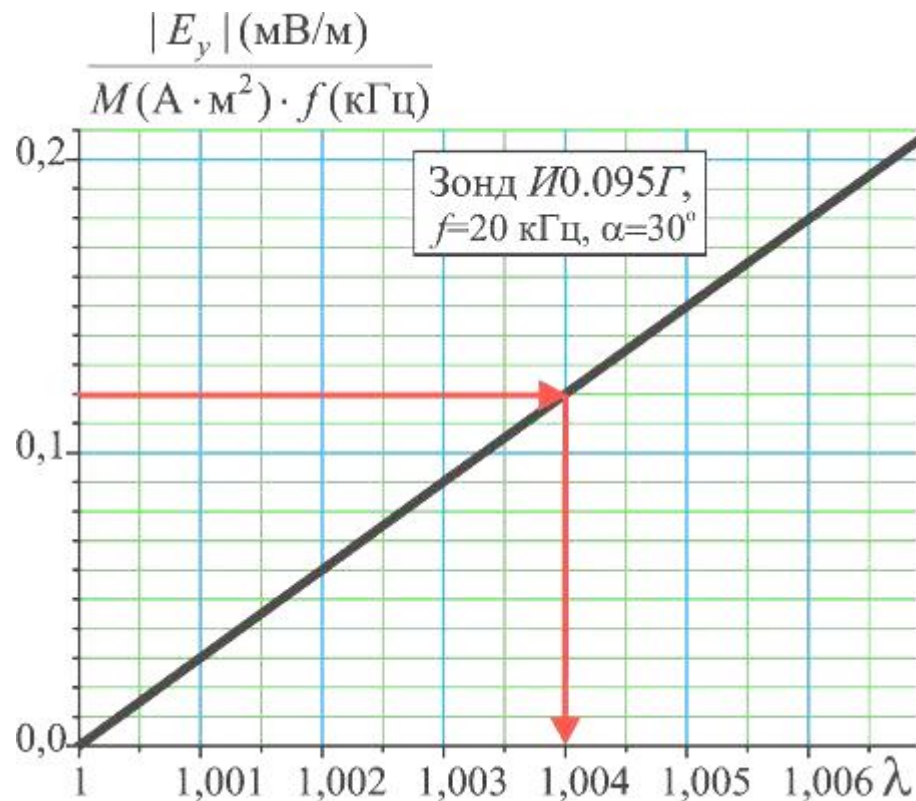
Рассмотренные выше примеры определения коэффициента анизотропии были подготовлены на основе результатов физического моделирования моделей анизотропного пласта пройденного моделью скважины под углом  $30^\circ$  и при частоте тока в генераторной катушке 10 кГц. Кроме того были проведены эксперименты при разных частотах (5 кГц, 20 кГц) и другом угле  $\alpha$  между осью зонда и осью анизотропии –  $45^\circ$ .

Пример определения коэффициента  $\lambda$  по результатам эксперимента при  $\alpha=45^\circ$  (кривая на рис. 3.16) показан на рис. 4.10. На рис. 4.11 коэффициент анизотропии определён по результатам измерений при частоте  $f=20$  кГц (кривая на рис. 3.14). В первом случае коэффициент анизотропии картона равен 1.006, во втором – 1.004. Вместе с тем, как было показано на рис. 4.4, диапазон изменения коэффициента  $\lambda$  модели пласта из влажного картона варьирует в следующих пределах: 1.004-1.019. Поэтому результаты определения  $\lambda$ , приведенные на рис, 4.10, 4.11 подтверждают возможность применения предложенной методики определения  $\lambda$  при различных значениях частоты  $f$  и угла  $\alpha$ .



**Рис. 4.10.** Определение коэффициента анизотропии модели пласта из картона по значениям  $|E_y|$ .





**Рис. 4.11.** Определение коэффициента анизотропии модели пласта из картона по значениям  $|E_y|$

### Выводы

1. На примере тех результатов, которые были получены при физическом моделировании, была опробована методика определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  по величине отношения  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$ . Для этого послужили приведенные на рис. 4.4, 4.5, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11 зависимости этого отношения от коэффициента  $\lambda$  при тех двух значениях угла  $\alpha$ , при которых были проведены экспериментальные исследования. При произвольном значении угла  $\alpha$  для определения  $\lambda$  может послужить номограмма, подобная той, которая приведена на рис. 2.2,а. Однако, как было показано в этой главе, такая номограмма будет более универсальной, если вместо значений  $|E_y|$ , либо  $|E_y|/H^{\text{II}}$  (рис. 2.2), пользоваться отношением  $\frac{|E_y|}{M \cdot f}$ .

2. Показанные на рис. 4.4, 4.5, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11 примеры определения коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  показали следующее. При применённых методиках измерений и интерпретации их результатов значения коэффициента  $\lambda$  пластов могут быть определены как в тех случаях, когда величина  $\lambda$  больше единицы на десятые доли процента (рис. 4.4, 4.10, 4.11), так и в тех случаях, когда коэффициент анизотропии равен нескольким единицам (рис. 4.9). Эти пределы изменения  $\lambda$  – типичны для анизотропных горных пород.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований, можно охарактеризовать следующим образом.

1. Для проведения экспериментальных исследований были сконструированы лабораторные установки. Они состояли из прототипа имеющего оригинальную конструкцию зонда электромагнитного каротажа и моделей пройденных скважиной анизотропных пластов различной мощности и с разными значениями коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$ . В прототипе зонда возбудителем электромагнитного поля служила многовитковая катушка с гармонически меняющимся электрическим током (переменный магнитный диполь). Датчиками были две короткие взаимно ортогональные измерительные линии  $MN$  с центрами на оси магнитного диполя. По данным измерений с таким зондом мы определяли амплитуду  $|E_y|$  одной из компонент ( $E_y$ ) электрического поля на оси расположенного в модели скважины магнитного диполя.

2. При лабораторных экспериментах были установлено то, какие явления оказывают искажающее влияние на результаты измерений. Основным из них был высокий уровень электромагнитных помех в широком диапазоне частот. Это связано с тем, что физическое моделирование проводилось в обычном помещении во МГРИ-РГГРУ, а не в специально оборудованной лаборатории. Для уменьшения влияния электромагнитных помех был принят ряд мер, что позволило значительно снизить влияние помех на результаты экспериментальных исследований.

3. Физическое моделирование было проведено для приближающихся к возможным реальным условиям измерений в скважинах трёхмерных моделей среды. Его результаты согласуются с теми результатами математического моделирования, которые были получены ранее нашим научным руководителем для более простых моделей среды (однородная анизотропная среда, анизотропный пласт в отсутствие модели скважины). Это, в частности,

означает, что присутствие скважины не оказывает значительного влияния на результаты измерений с зондом описанной выше конструкции. Поэтому номограммами, полученными на основе расчётов для однородной анизотропной среды, мы могли пользоваться при обосновании методики определения коэффициента анизотропии на примерах результатов физического моделирования.

4. Экспериментально подтверждено, что при острых углах  $\alpha$  между осью скважины и осью анизотропии пласта по данным измерений с имеющим оригинальную конструкцию зондом электромагнитного каротажа может быть определён коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$  пласта. Определение коэффициента анизотропии  $\lambda$  возможно в том случае, если этот коэффициент не превышает нескольких единиц, что типично для многих электрически анизотропных горных пород.

Дальнейшим направлением исследований по этой тематике могло быть конструирование габаритного макета зонда электромагнитного каротажа и проведение измерений в скважинах с этим макетом зонда.

**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. Каротаж истинных (поперечных) сопротивлений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1979, № 3, С. 99-110.
3. Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважине // Изв. вузов. Геология и разведка. 1978, № 4, С. 81-95.
4. Альпин Л.М. Теория дипольных зондирований. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1950. 88 с.
5. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. Учебник для ВУЗов, 1985, Недра. 407 с.
6. Алексеев А.Д., Волокитин Я. Е., Карнаух Д.А. Опыт и перспективы применения современных комплексов ГИС и ГДИС на месторождениях Салымской группы, журнал «Инженерная практика», №11-12, 2011 г.
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. Анисимов Л.А., Буторин Е.н., Гончаров Г.А. и др.; Под ред. В.С. Насонова. Справочник по радиоизмерительным приборам: В 3-х т. Т.3. Измерение электромагнитных полей. Анализ спектра. Осцилография. Импульсные измерения – М. Сов. радио, 1979.
9. Антонов Ю.Н. Изопараметрическое каротажное зондирование (обоснование ВИКИЗ). // Геология и геофизика. 1980, № 6, С. 81-91.
10. Беркутов А.М., Гиривенко И.П, Прошин Е.М., Рязанов В.И. Цифровая осцилография. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вызов. 5-е изд., перераб. и доп. СПб.: Питер, 2004.
12. Вержбицкий В.В. Зонды БКЗ в трехосно-анизотропной среде // Геология и геофизика. 1993. №4. С. 145-147
13. Вержбицкий В.В. Электромагнитные поля в слоистой анизотропной среде. «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1988, № 4, С. 99-102.
14. Горбачев Ю.И. Геофизические исследования скважин, Москва, Недра, 1990.
15. Губатенко В.П. Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке. «Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли», 1991, № 4, С. 88-98
16. Даев Д.С. Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1974
17. Дахнов В.Н. Каротаж скважин. Интерпретация каротажных диаграмм. Гостоптехиздат, 1941.
18. Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.
19. Дахнов В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин, Недра, 1981.
20. Дашевский Ю.А. Изучение электрической анизотропии горных пород в скважинах, учебное пособие, Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск, 2008.
21. Дашевский Ю.А., Табаровский Л.А. Определение коэффициента анизотропии установками бокового каротажного зондирования // Геология и геофизика. 1987, № 9. С. 131-132.
22. Дашевский Ю. А. Применение преобразования Эйлера для расчета стационарных и гармонических электромагнитных полей в горизонтально-слоистых средах. В кн. Электромагнитные методы геофизических исследований. ИГ и Г СО АН СССР. Новосибирск, 1982.
23. Дмитриуков 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 промышленной геофизики. Гостоптехиздат, 1957.

25. Галахова О.П. Основы фазометрии. – Л.: Энергия, 1976.

26. Глинских В.Н., Эпов М.И. Численное моделирование диаграмм электромагнитного каротажа при описании электропроводности тонкослоистых коллекторов непрерывными функциями. Научный журнал «Геология и геофизика», т. 50, №8, 2009.

27. Журавлев В.П. Определение удельных сопротивлений анизотропных пластов. Прикладная геофизика, вып.51. - М.: Недра, 1968, С. 170-186.

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

29. Каринский А. Д. Влияние электрической анизотропии горных пород на электромагнитное поле в скважине. Диссертация на соискание учёной степени доктора физ.-мат. наук. М., 2008 г.

30. 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.

31. 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.

32. Каринский А. Д. Индуцированные заряды в микро- и макроанизотропных средах и их влияние на электрическое поле в анизотропных пластах, пройденных скважиной. «Геофизика». Научно-технический журнал Межрегиональной общественной организации «Евро-Азиатское Геофизическое Общество», 2010, № 2, С. 37-48

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. Д., Красносельских А. А. Математическое и физическое моделирование зонда электромагнитного каротажа предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород. Электронное научное издание "ГЕОразрез", выпуск №1- 2015(15); Режим доступа: <http://www.georazrez.ru/issue-archive/2015/15/>.

38. Каринский А. Д. Красносельских А. А. Моделирование каротажного зонда, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии пород. Научно-технический журнал «Геофизика», 2016, №1, С. 26-33.

39. 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.



40. Карпенко И.А., Черемисин А.А, Куликов Д.А. Морфология, условия залегания и внутреннее строение рудных тел на месторождении Сухой Лог. Научно-технический журнал "Руды и металлы", 2008, №2, С. 11-26.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

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. Кауфман А. А. Теория индукционного каротажа. Новосибирск, Наука, 1965, 236 с.

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

51. Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. М.: Научный мир, 2000.

52. Красносельских А. А. Лабораторное моделирование зонда электромагнитного каротажа новой конструкции. Тезисы доклада. // VII Международная конференция «Молодые – наукам о Земле». М., 2014, том 1, С. 109-110.

53. Красносельских А. А. Лабораторное моделирование нового зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород. XII Международная научно-практическая конференция “Новые идеи в науках о Земле”. Доклады. М., 2015, том 1, С. 494- 495.

54. Красносельских А.А. Опробование методики определения коэффициентов электрической анизотропии моделей пройденных скважиной пластов по результатам лабораторных экспериментов. VIII Международная конференция «Молодые – наукам о Земле». М., 2016, С. 135-137.

55. Красносельских А. А., Каринский А. Д. Опыт лабораторного и математического моделирования нового зонда электромагнитного каротажа для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород. Научно-технический журнал "Руды и металлы", 2015, №3, С. 78-84.

56. Красносельских А.А. Физическое моделирование каротажного зонда, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии

пород. Тезисы доклада. // VIII Международная конференция «Молодые – наукам о Земле». М., 2016, С. 133-135.

57. Красносельских А. А. Физические предпосылки измерения компоненты  $\text{Im}E_y$  в электромагнитном каротаже для изучения анизотропии пластов. Тезисы доклада. // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Доклады, 2013, том 1, С. 401-402.

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

59. 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".

60. Молчанов А.А., Дортман Н.Б. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга вторая. Техника и методика исследований – М.: Недра, 1992.

61. Паньков С. Ткаченко Ю., Макарычев Г., Свихнушин Н., Троицкая Е., Тухтаев Р. Опыт использования расширенного комплекса ГИС при исследовании сложнопостроенных карбонатных коллекторов Тимано-Печорской НГП. Научно-технический журнал «Технологии ТЭК», 2006, №1

62. Плюснин М.И. Индукционный каротаж. – М.: Недра, 1968.

63. Сайт для Радиолобителей. Режим доступа: <http://radio-stv.ru/>

64. Сайт ТНГ – Групп. Скважинный наклономер НИД-2. Режим доступа: [http://www.tng.ru/prj/sr\\_girs/ts17](http://www.tng.ru/prj/sr_girs/ts17)

65. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Изд. ЛКИ, 2008, 656 с.

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

67. Сидорчук А.И. Электрокаротаж в анизотропной среде с неоднородной зоной проникновения // Изв. АН СССР/ Физ. Земли, 1971, № 6. С. 41-47.

68. Старостин В.И., Игнатов П.А. Геология полезных ископаемых М.: Изд-во МГУ, 1997
69. Табаровский Л.А., Черяука А.Б. Математическое моделирование электромагнитных полей в анизотропных средах. Деп. В ВИНТИ 19.07.88, № 6261-B88.
70. Табаровский Л.А., Эпов М.И. Электромагнитные поля гармонических источников в слоистых анизотропных средах. Геология и геофизика 1977, № 1, С. 101-109.
71. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. – М.: Недра, 1985.
72. 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.
73. Тихонов А.Н. О распространении электромагнитного поля в слоистой анизотропной среде. 1959. ДАН СССР, т.126, №5, С. 967-970.
74. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов 11-е изд., М.: «Академия», 2006. — 560 с
75. Тюркишер Р.И. Электрокаротаж в анизотропной среде // Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз. 1945, т. IX, № 3. С. 279-287.
76. 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.
77. Фритч Ф. Электрические измерения в трехмерных проводниках применительно к прикладной геоэлектрике. Пер. с нем. Л.И. Акинфиева под ред. А.М. Алексеева – М.: Гостоптехиздат, 1963.
78. 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.

79. 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.

80. 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.

81. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Соболев А.Ю. Выделение пластов в терригенном разрезе по данным ВИКИЗ // Каротажник, 1999, № 57, С. 58-69.

82. 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.

83. Эпов М.И., Суховукова К.В. Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах. Материалы научно-практической конференции Пути развития и повышения эффективности электрических и электромагнитных методов изучения нефтегазовых скважин, Новосибирск, Издательство СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998.

84. Эйдман И.Е. а.с. 272448 СССР, МКИ G01V 3/04/G01V 3/18. Способ индукционного каротажа скважин, 1970. – 4 с.

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

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

87. 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.

88. 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.

89. 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.

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

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. Doll H.G. The Laterlog a New Resistivity Logging Method with Electrodes Using an Automatic Focusing System. *Petr. Develop. a Technol.*, vol. 192, 1951.

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. Gianzero S., 1999, The paradox of anisotropy revisited, *The Log Analyst*, Vol. 40, No. 6, pp. 485-491.

99. 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.

100. 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.

101. Hantek – производитель измерительного оборудования. Режим доступа: <http://www.hantek.ru>

102. Karinski A. Physical preconditions of different field components measurements at electromagnetic logging for anisotropy parameters estimation. UGM, Puerto Vallarta, México, 5-10 November. 2001.

103. Kaufman A.A. and Keller G.V. *Induction Logging*. – Elsevier, Amsterdam, 1989

104. Kaufman A.A., and Keller G.V. *Induction logging. Methods in geochemistry and geophysics*, Volume 27. 1989.

105. Kriegshäuser B., Fanini O., Forgang S., Itskovich G., Rabinovich M., Tabarovsky L., Yu L., Epov M., and Horst J., 2000. A new multi-component induction logging to resolve anisotropic formation, SPWLA 41st Annual Logging Symposium, Paper D.

106. Kuckes Arthur F. Apparatus for locating an elongated conductive body by electromagnetic measurement while drilling. Vector Magnetics. United States Patent 4933640. June 12, 1990.

107. Moore Robert A. Well logging apparatus for obtaining azimuthally sensitive formation resistivity measurements. Pathfinder Energy Services, Inc. United States Patent 7436184. October 14, 2008.

108. 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.

109. M. Pöppelreiter, C. García-Carballido, M. Kraaijveld DIPMETER AND BOREHOLE IMAGE LOG TECHNOLOGY, AAPG Memoir, 1992

110. Schlumberger C. Et M. Communication sur la carottage électrique II Congrès International de forage Paris Saint Etienne 1929.

111. Schlumberger C., Etudes sur la prospection électrique du sous-sol, 80 pp., Gauthier-Villars, Paris, 1920.

112. 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.

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

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

115. Zhdanov M.S., Kennedy W.D., Cheryauka A.B., and Peksen E., 2001. Principles of tensor induction well logging in a deviated well in an anisotropic medium, SPWLA 42st Annual Logging Symposium, Paper R