

**Красносельских Андрей Андреевич**

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

Специальность: 25.00.10 – Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016 г.

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

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
**Шевнин Владимир Алексеевич**

доктор геолого-минералогических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»  
**Коваленко Казимир Викторович**

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

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

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н, доцент



Романов Виктор Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

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 моделирования для имеющего оригинальную конструкцию прототипа зонда электромагнитного каротажа. При выполнении определённых условий "показания" такого зонда зависят только от одного электрического параметра окружающей скважину среды - коэффициента электрической анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t}$ . Здесь  $\rho_n$  - поперечное удельное электрическое сопротивление по оси анизотропии  $n$  (ориентированной, например, по нормали к напластованию тонкослоистых пород), а  $\rho_t$  - продольное удельное электрическое сопротивление по любому направлению  $t$ , ортогональному оси  $n$ .

Влияние электрической анизотропии на результаты геофизических исследований скважин (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 признано, что определение коэффициента электрической анизотропии горных пород имеет важное значение. Это связано в первую очередь с тем, что электрически анизотропные горные породы являются благоприятной средой для локализации некоторых рудных полезных ископаемых.

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 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 неё до "измерителей поля" (датчиков)  $I$  такую генераторную антенну можно аппроксимировать переменным магнитным диполем с магнитным моментом  $M$ . Если, как в методе ИК, 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 пород.

### **Цель работы:**

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

### **Основные задачи исследований**

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 электромагнитных 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 и тех условий, при которых возможно количественное определение коэффициента электрической анизотропии.

### **Научная новизна**

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.

### **Практическая ценность**

Результаты физического моделирования показали, что применение зонда электромагнитного каротажа новой конструкции при определённых условиях позволяет определить коэффициент электрической анизотропии  $\lambda$  горных пород. Это может служить основанием для применения имеющего такую конструкцию зонда при геофизических исследованиях скважин с целью определения коэффициента электрической анизотропии горных пород.

### **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.

### **Личный вклад**

Вклад автора в результаты исследований 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. Все результаты физического моделирования, вошедшие в диссертационную работу, были получены лично автором.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из 4 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».

### **Благодарность**

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, доктору физико-математических наук А. Д. Каринскому за предоставление интересной темы диссертационной работы, поддержку на всех этапах проведения исследований, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** охарактеризована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи, теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна результатов, приведены защищаемые положения.

### **Глава 1. Электрические параметры анизотропных горных пород и возможность их определение по результатам электрических и электромагнитных методов ГИС**

В разделе 1.1 «**Удельное электрическое сопротивление анизотропных пород и коэффициент электрической анизотропии**» приведены сведения об электрических параметрах анизотропных горных пород и известных методах ГИС для определения параметров электрически анизотропных пород, пройденных скважиной.

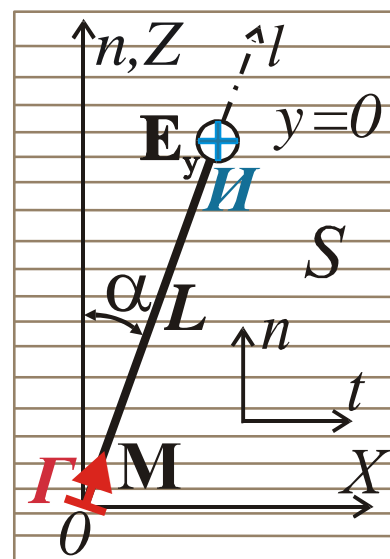
В разделе 1.2 «**Электрическая анизотропия пород - коллекторов нефти и газа**» на примере тонкослоистых и сложнопостроенных коллекторов углеводородов показано, как влияет электрическая анизотропия на определение практически значимых геолого-геофизических параметров таких коллекторов. Отмечено также то, какие проблемы существуют при определении электрических параметров анизотропных пород.

В разделе 1.3 «**Электрическая анизотропия пород, слагающих рудные месторождения**» приведена классификация типов месторождений по генетическому признаку и охарактеризованы наиболее значимые из тех условий, при которых определение параметров электрической анизотропии горных пород может быть полезно для выявления оруденения. В частности, это относится к месторождениям магматической, пегматитовой групп, хемогенного, биохимического и осадочно-катагенетического классов. Кроме того, определены те обстановки, связанные с условиями бурения скважин, при которых можно определить параметры электрической анизотропии пород предложенным в этой работе способом.

### **ГЛАВА 2. Электрическое поле переменного магнитного диполя в моделях анизотропной среды**

Для обоснования конструкции прототипов зондов, с которыми было проведено физическое моделирование, и методики определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  послужили аналитические выражения и результаты математического моделирования, полученные моим научным руководителем, доктором физ.-мат. наук А. Д. Каринским.

В разделе 2.1 «**Электрическое поле магнитного диполя в однородной анизотропной среде**» приведены выражения для плотности электрических зарядов, индуцируемых в анизотропной среде полем переменного магнитного диполя, и для компонент электрического поля **E**.



**Рис. 1. Взаимная ориентация оси  $l$  зонда и оси анизотропии  $n$**

Показано, что (для квазистационарного поля в немагнитной среде) в ближней зоне (при  $|k_t|L \ll 1$ ) и при  $\alpha \neq 0$  амплитуду ортогональной плоскости рис. 1 компоненты  $E_y$  на оси  $l$  магнитного диполя  $\Gamma$  определяет выражение:

$$|E_y|(H) \approx \frac{M \cdot f \cdot \mu_0}{2L^2} \left[ \operatorname{ctg} \alpha \cdot \left( \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha}} - 1 \right) \right]. \text{ Здесь } L - \text{ "длина зонда",}$$

$k_t = \sqrt{(i\omega\mu_0)/\rho_t}$  - продольное волновое число,  $i$  - мнимая единица,  $M$  - амплитуда магнитного момента диполя,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м) - магнитная постоянная,  $f$  - частота,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $\alpha$  - угол между осью анизотропии  $n$  и осью зонда  $l$  (рис. 1).

Из выражения для  $|E_y|$  видно, что при заданных значениях  $M, f, L$  величина  $|E_y|$  зависит только от  $\lambda$  и  $\alpha$ . Приведен пример номограммы для определения коэффициента  $\lambda$  по нормированной на первичное магнитное поле  $H^I$  величине  $|E_y|$  и углу  $\alpha$  (рис. 2).

В разделе 2.2 «Электрическое поле переменного магнитного диполя в присутствии анизотропного пласта в изотропной вмещающей среде» приведены примеры расчётных кривых  $|E_y|$  против моделей анизотропных пластов конечной мощности при фиксированных значениях  $L$  и  $\alpha$ . Результаты математического моделирования получены на основе решения прямой задачи для одномерной модели среды - в отсутствие модели скважины. Приведенные в этом разделе данные позволили оценить то, какое влияние на величину  $|E_y|$  оказывают границы пластов.

В разделе 2.3 «Оценка требований к допустимой погрешности измерений для зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$ » на основе выражений для  $|E_y|(H)$  в однородной анизотропной среде при  $|k_t|L \ll 1$  получены приближённые равенства. Они характеризуют влияние погрешностей измерения  $|E_y|$  и угла  $\alpha$  на относительную погрешность  $\delta\lambda$  определения коэффициента анизотропии  $\lambda$ . Результаты расчётов показали, в частности, что погрешность  $\delta\lambda$  растёт с увеличением коэффициента  $\lambda$ .

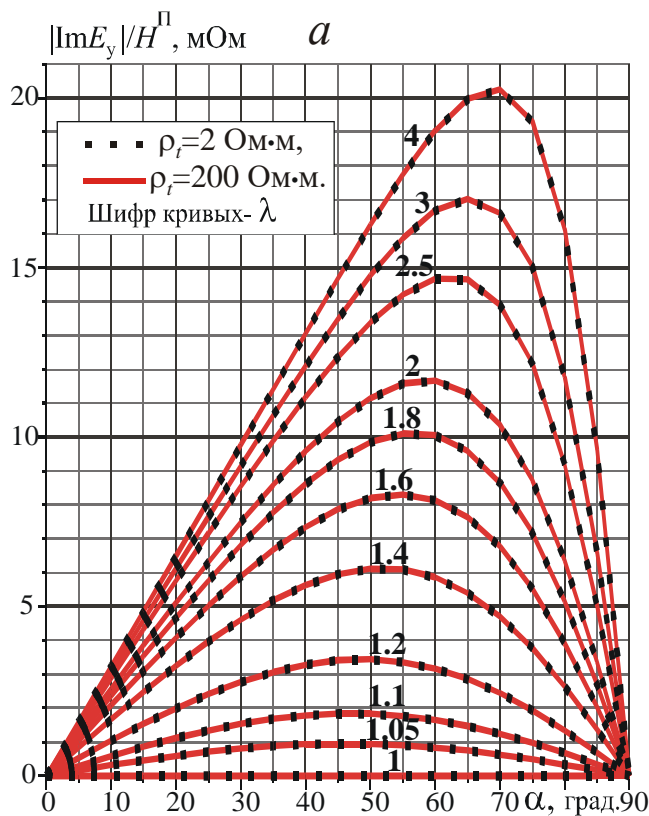


Рис. 2. Номограмма для определения коэффициента  $\lambda$



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

В разделе 3.1 «Модели среды в лабораторных установках при физическом моделировании» рассмотрены принятые конструкторские решения и материалы, примененные при создании лабораторных установок для физического моделирования.

Было сконструировано несколько лабораторных установок, состоящих из модели пройденного скважиной анизотропного пласта в изотропной вмещающей среде, прототипов зондов электромагнитного каротажа и необходимой для проведения измерений генераторной и измерительной аппаратуры. Физические эксперименты были проведены при расположении модели пройденного скважиной анизотропного пласта в пластиковом баке объемом 120 литров (рис. 3, а).

Модель анизотропного пласта с не значительно превышающим единицу коэффициентом электрической анизотропии  $\lambda$  была сконструирована из слоёв картона. Толщина одного слоя влажного (в связи с его длительным нахождением в воде) картона была равна примерно 4 мм, суммарная мощность  $H$  анизотропного пласта из 30-и слоёв, для которой были получены первые экспериментальные результаты, была равна 120 мм. Слои картона имели форму прямых круговых цилиндров диаметром немного меньше, чем диаметр бака (приблизительно

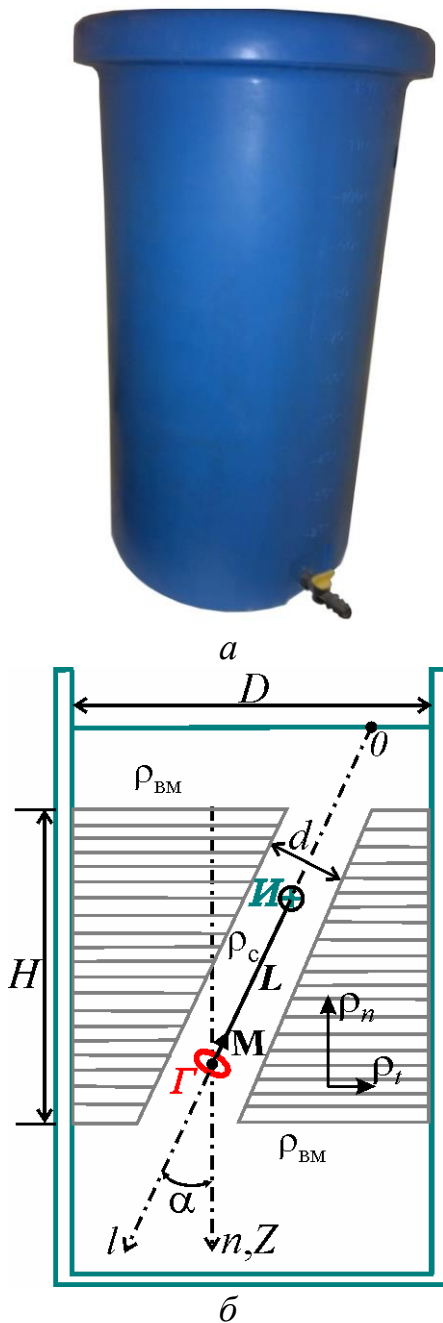


Рис 3 Бак, в котором было проведено физическое моделирование (а) и схема лабораторной установки (б)

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

Модель пласта с аномально-высоким коэффициентом анизотропии была сконструирована из чередующихся прослоев картона и полиэтиленовой (ПЭТ) пленки. Позже были созданы модели анизотропного пласта из чередующихся прослоев картона и ПЭТ пленки, в которых прослой из пленки для уменьшения величины коэффициента анизотропии модели пласта имели отверстия. Во всех лабораторных моделях среды изотропные вмещающие пласт породы и модель скважины имитировала водопроводная вода с удельным электрическим сопротивлением  $\rho \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Моделью наклонной (по отношению к границам

пласта) скважины служило имеющее круговое сечение цилиндрическое отверстие в модели пласта диаметром  $d \approx 20$  мм (рис. 3, б).

В разделе 3.2 «Прототип зонда и измерительная аппаратура при физическом моделировании» описано устройство прототипов зонда электромагнитного каротажа, генераторная и измерительная аппаратура, применённая при моделировании.

Прототип зонда состоял из следующих узлов: генераторная антенна  $\Gamma$  – многовитковая катушка на ферритовом сердечнике; измерительный блок из двух взаимно-перпендикулярных и

ортогональных оси  $l$  зонда (расположенных выше  $\Gamma$ ) измерительных линий  $MN$  и  $M'N'$ , обозначенных  $I$  на рис. 3, б. При проведении большей части лабораторных измерений расстояние между центрами генераторной антенны  $\Gamma$  и измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$  (длина зонда  $L$ ) было равно  $95 \text{ мм} = 0.095 \text{ м}$ . Результаты физического моделирования были получены при длинах измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$ , равных 18 мм. По аналогии с обозначениями, принятыми для зондов ИК, для основного, применявшегося при лабораторном моделировании зонда (рис. 4, а), использовано обозначение  $И0.095Г$ .

На рис. 4, б показана возможная схема габаритного макета зонда электромагнитного каротажа, отличие которого от прототипа, результаты измерений с которым приведены в этой работе, состоит в следующем. Кроме измерительных линий  $MN$  и  $M'N'$ , зонд имеет датчик в виде приёмного магнитного диполя для определения первичного магнитного поля  $H^П$  генераторного магнитного диполя  $\Gamma$ .

В разделе 3.3 «Технические решения, применённые для выявления влияния помех при физическом моделировании и для уменьшения влияния помех» рассмотрены факторы, оказывающие искажающее влияние на результаты определения величины  $|E_y|$ , и способы уменьшения этого влияния.

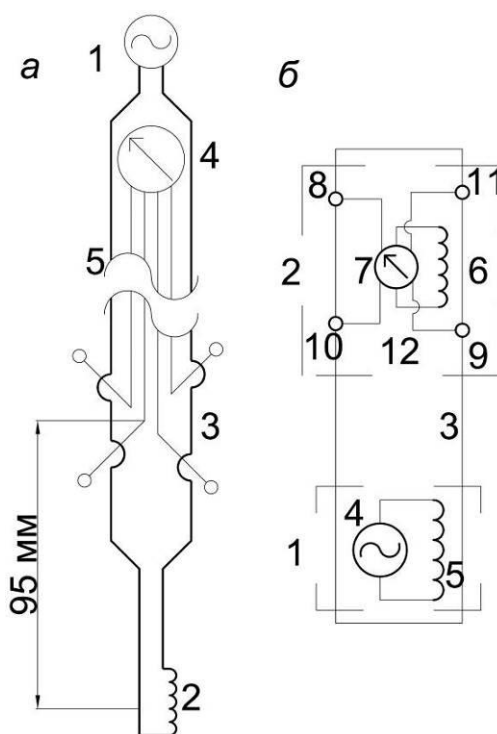


Рис 4 Блок-схема прототипа зонда  $И0.095Г$  (а) и перспективного зонда (б)

- 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 – взаимно перпендикулярные линии  $MN$ , 12 – соединительные провода

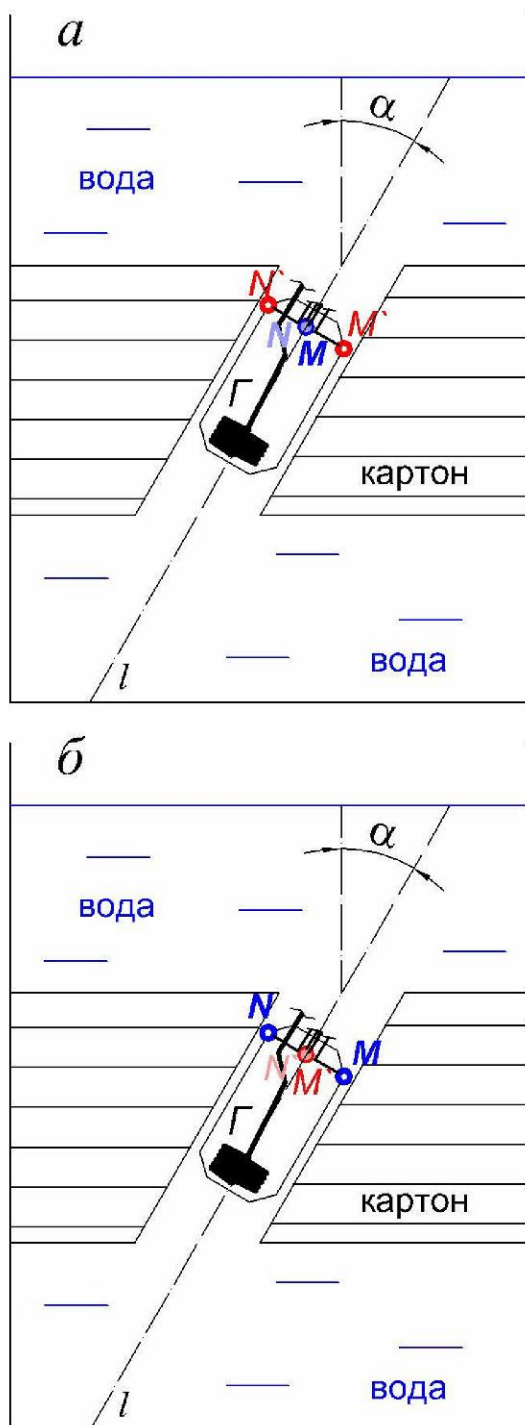


Рис. 5. К методике, примененной для учета влияния «наводки» с генератора и соединительных проводов на напряжение в измерительных линиях  $MN$  и  $M'N'$

сигнала и помехи. При повороте прототипа зонда на  $90^\circ$  вокруг своей оси (рис. 5,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 позволила оценить вклад помехи в напряжение в измерительных линиях и учесть ее влияние при определении полезного сигнала и величины  $|E_y|$  при физическом моделировании.

Для снижения влияния электромагнитных помех на результаты физического моделирования было применено два подхода. Первый из них связан с использованием специальных материалов: коаксиального кабеля для передачи сигнала от генератора и к измерителю без потерь и ферритового фильтра – для снижения влияния электромагнитных помех сторонних источников. Второй подход основан на том, что измеряемый сигнал имеет фиксированную частоту, что делает возможным фильтрацию измеряемого сигнала.

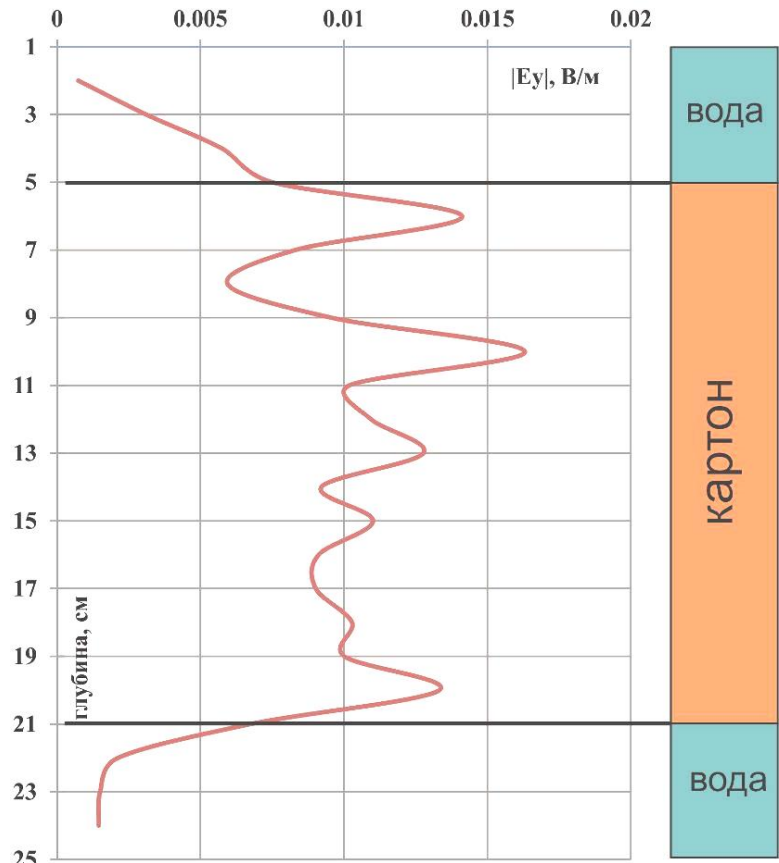
Другого подхода потребовала задача выделения полезного сигнала, возбуждаемого генераторным магнитным диполем, на фоне помех, обусловленных работой самого генератора и электрическим током в проводах. В данном случае сигнал и помеха имеют одинаковую частоту, что не позволяет использовать фильтрацию.

В условиях лабораторных экспериментов удалось уменьшить обусловленную работой генератора помеху на результаты измерений, пользуясь следующим приемом. Так как геометрические параметры моделей пластов были известны, перед измерениями можно было провести калибровку, попеременно ориентируя приемные линии  $MN$  и  $M'N'$  ортогонально оси напластования (рис. 5). При ориентировке этих линий, показанной на рис. 5,а, полезный сигнал в линии  $M'N'$  равен нулю. Напряжение электрического поля в линии  $MN$  будет суммой полезного

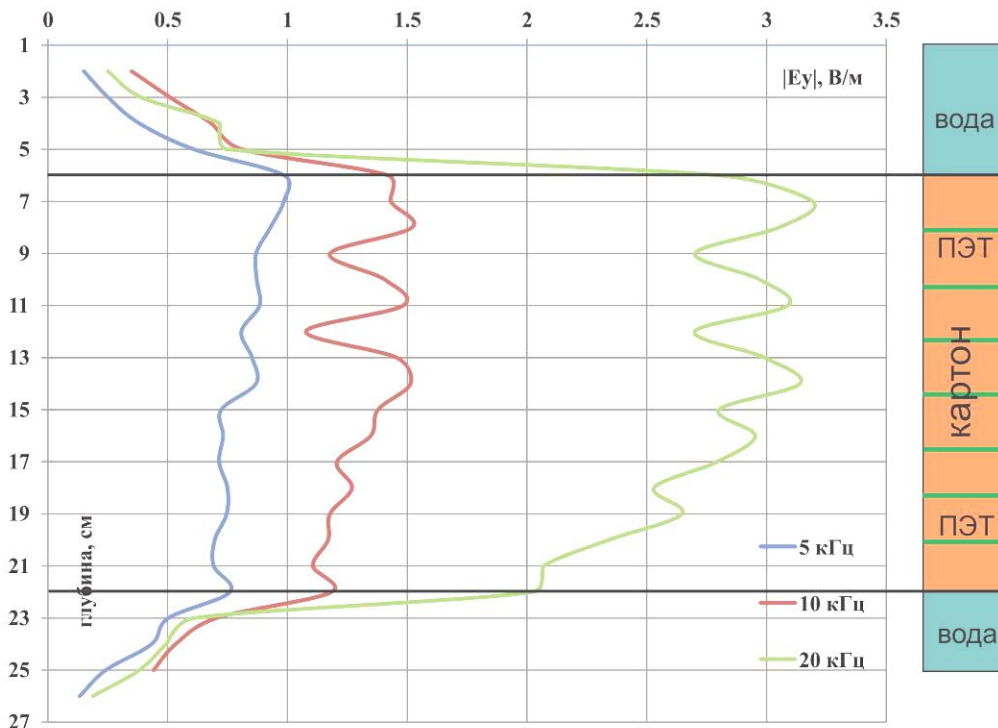
В разделе 3.4 «Результаты физического моделирования прототипа нового зонда» представлены кривые  $|E_y|$  против моделей анизотропных пластов, построенные по результатам физических экспериментов.

Для подтверждения того, что полученные на основе решения прямой задачи зависимости остаются справедливыми при расположении зонда в скважине были проведены серии экспериментов с моделями среды с разными значениями коэффициента электрической анизотропии. Измерения были проведены при нескольких частотах  $f$  тока в генераторной катушке, при разных длинах  $L$  прототипов зонда.

На рис. 6 и 7 приведены



**Рис. 6 Результаты физического моделирования.** Прототип зонда ИЮ.095Г, модель среды – картон,  $H=13$  см, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$



**Рис. 7 Результаты физического моделирования.**

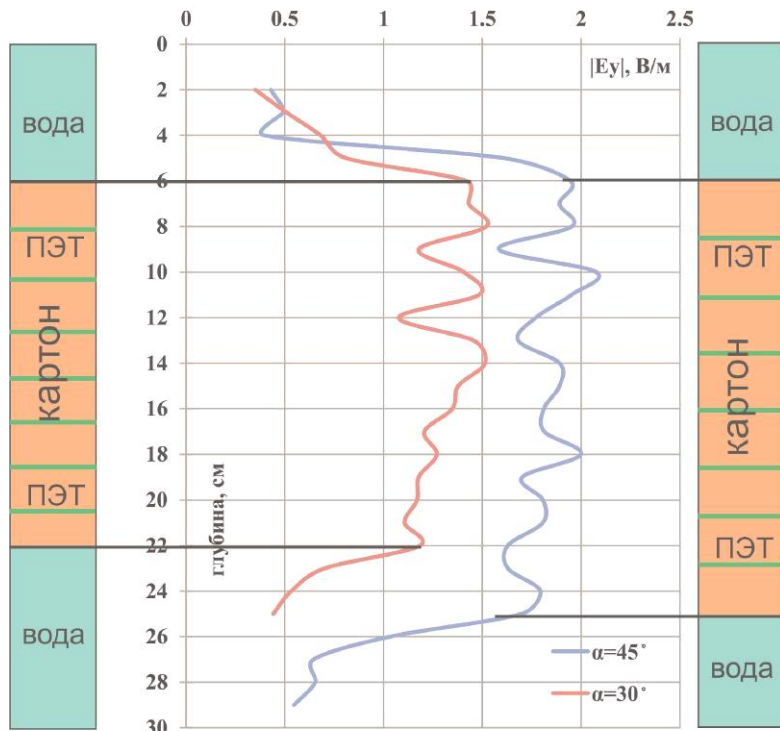
Прототип зонда ИЮ.095Г, модель среды – картон с ПЭТ,  $H=13$  см, разные частоты,  $\alpha=30^\circ$

результаты физического моделирования прототипа зонда, у которого длина  $L$  равна 0.095 м, модель анизотропного пласта в первом случае изготовлена из картона, во втором – представлена чередованием прослоев картона и ПЭТ пленки, изотропная вмещающая среда – вода с удельным электрическим сопротивлением  $\rho \approx 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , угол  $\alpha = 30^\circ$ .

На рис. 6 и 7 видно, что кривые  $|E_y|$  осложнены локальными экстремумами. Это, по-видимому, обусловлено различием удельного электрического сопротивления слоёв картона, связанного с неодинаковым их "размоканием" в воде. Вместе с тем, на этих рисунках видно, что по результатам измерений величины  $|E_y|$  с прототипом зонда электромагнитного каротажа можно уверенно выделить анизотропные пласты, расположенные в изотропной вмещающей среде.

Для проверки того, какое влияние оказывает изменение частоты  $f$  на определяемую по результатам измерений величину  $|E_y|$ , были проведены серии измерений в модели пройденного скважиной анизотропного пласта "картон-ПЭТ", при разных частотах  $f$ . Пример результатов измерений, полученных при трёх разных значениях частоты  $f$ , приведен на рис. 7.

Как видно на этом рисунке, осреднённые значения напряжения электрического поля в измерительных линиях против анизотропного пласта и определяемые по ним значения  $|E_y|$  пропорциональны частоте  $f$ . Это согласуется с выводами, полученными на основе решения прямой задачи для более простой, по сравнению с применённой при физическом моделировании, модели однородной анизотропной среды.



**Рис. 8 Результаты физического моделирования при двух значениях угла  $\alpha$ .**

Прототип зонда ИО.095Г, модель среды - картон с ПЭТ,  $H = 13 \text{ см}$ , частота  $f = 10 \text{ кГц}$

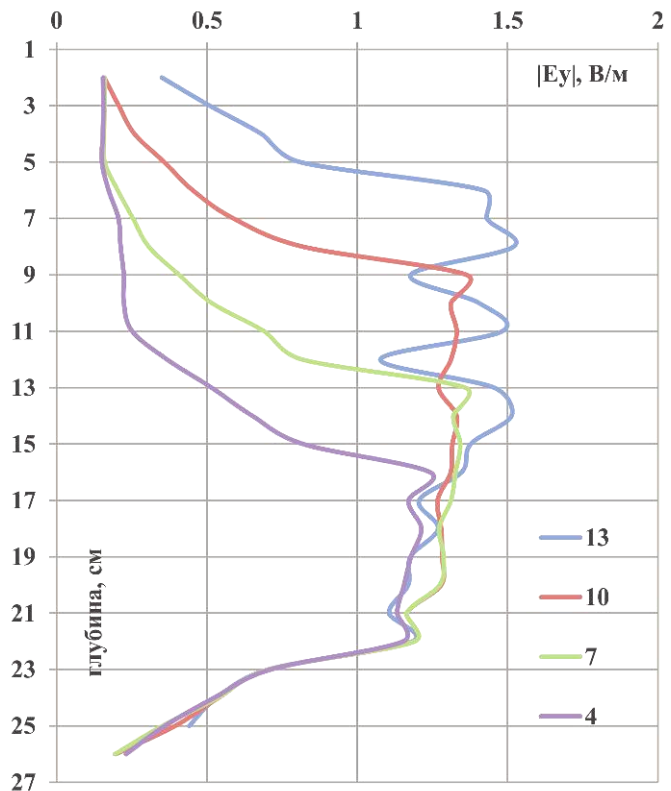
Показанные на рис. 8 кривые  $|E_y|$  против модели пройденного скважиной пласта с высоким значением коэффициента анизотропии  $\lambda$  (модель - картон – ПЭТ) получены при двух значениях угла  $\alpha$  ( $30^\circ$  и  $45^\circ$ ). На этом рисунке видно, что осреднённые значения  $|E_y|$  против модели пласта при угле  $\alpha = 45^\circ$  приблизительно в полтора раза больше, чем при  $\alpha = 30^\circ$ . Это согласуется с результатами расчётов для модели однородной анизотропной среды при высоких значениях коэффициента  $\lambda$  (рис. 2, 10,а).

На рис. 9 показаны кривые, полученные при



разной мощности  $H$  модели анизотропного пласта: ( $H=13$  см,  $10$  см,  $7$  см и  $4$  см). С уменьшением мощности  $H$  анизотропного пласта (и, соответственно, убыванием видимой мощности пласта, равной  $H/\cos(\alpha)$ ), происходит пропорциональное уменьшение ширины аномалии  $|E_y|$  против пласта. При этом уменьшение мощности  $H$  пласта не оказывает существенного влияния на осреднённое значение величины  $|E_y|$  против пласта даже в том случае, когда мощность  $H$  меньше длины зонда  $L$ . Как видно, на рис. 9, осреднённые значения  $|E_y|$  против пластов с мощностями  $H=7$  см,  $H=10$  см и  $H=13$  см - почти одинаковы и равны приблизительно  $1.3-1.4$  В/м. При первом из указанных значений  $H$  мощность пласта - меньше длины зонда  $L$ , равной  $9.5$  см.

На основе приведенных на рис. 9 результатов физического моделирования можно сделать вывод о том, что предназначенный для определения коэффициента электрической анизотропии и имеющий оригинальную конструкцию зонд, с прототипом которого проведено физическое моделирование, имеет высокую разрешающую способность. Эту особенность (высокую "разрешающую способность") такого зонда можно объяснить следующим образом. Генераторный переменный магнитный диполь  $\Gamma$  в этом зонде служит лишь для того, чтобы возбудить не зависящее от параметров среды первичное магнитное поле  $\mathbf{H}^n$ . Переменное поле  $\mathbf{H}^n$  по закону электромагнитной индукции создаёт (также не зависящее от среды) первичное электрическое поле  $\mathbf{E}^n$ , которое равно нулю на оси  $l$  магнитного диполя  $\Gamma$ . Электрическое поле  $\mathbf{E}^n$  индуцирует в анизотропных пластах и на границах пластов электрические заряды. При нахождении коротких измерительных линий  $MN$ ,  $M'N'$  (с центрами на оси  $l$ ) в ближней зоне магнитного диполя  $\Gamma$  напряжения поля  $\mathbf{E}$  в этих линиях – это напряжения кулонова (гальванического) поля индуцированных зарядов. Поэтому для результатов измерений с таким зондом не очень существенно то, где находится магнитный диполь  $\Gamma$  - против анизотропного пласта, или против вмещающей этот пласт среды.



**Рис. 9 Результаты физического моделирования при разной мощности  $H$  модели анизотропного пласта.**

Прототип зонда ИО.095Г, модель среды - картон с ПЭТ, частота  $f=10$  кГц,  $\alpha=30^\circ$

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

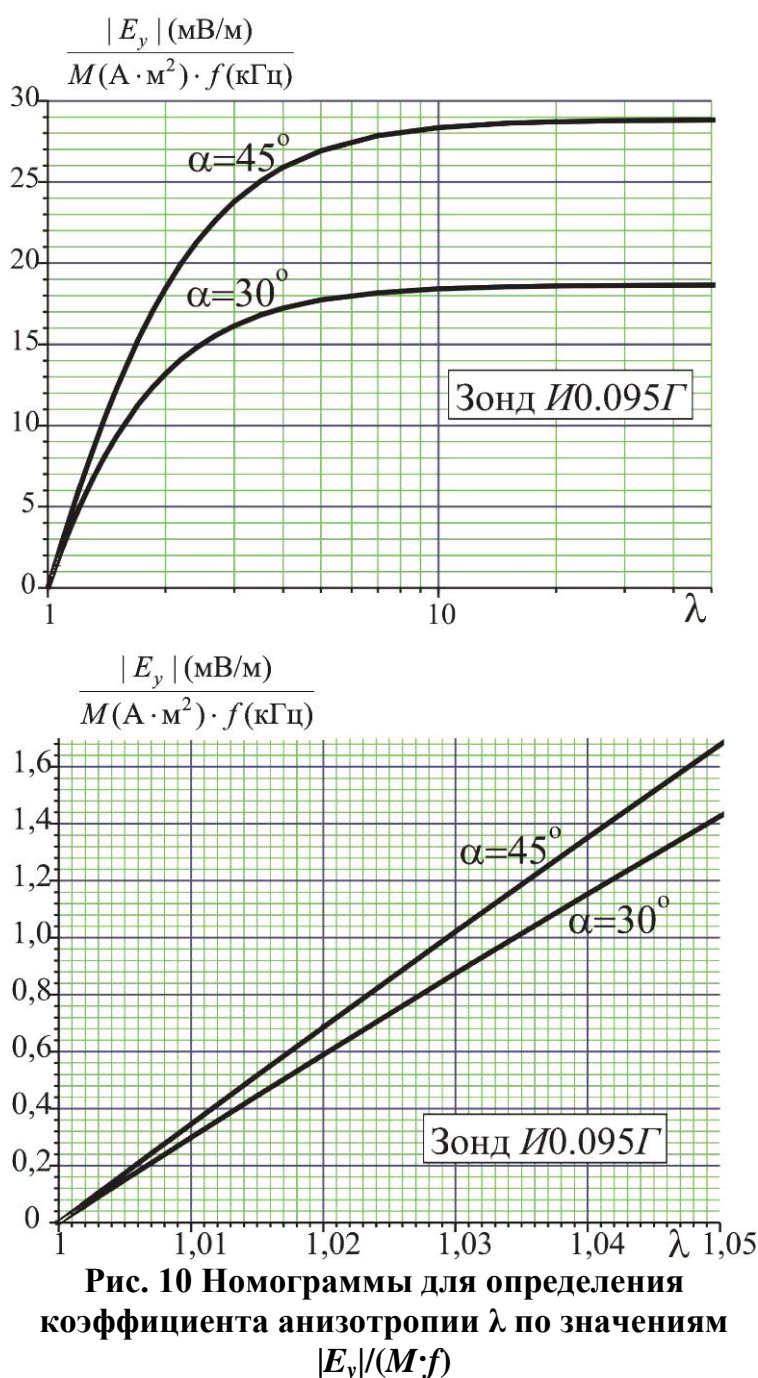


Рис. 10 Номограммы для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значениям  $|E_y|/(M \cdot f)$

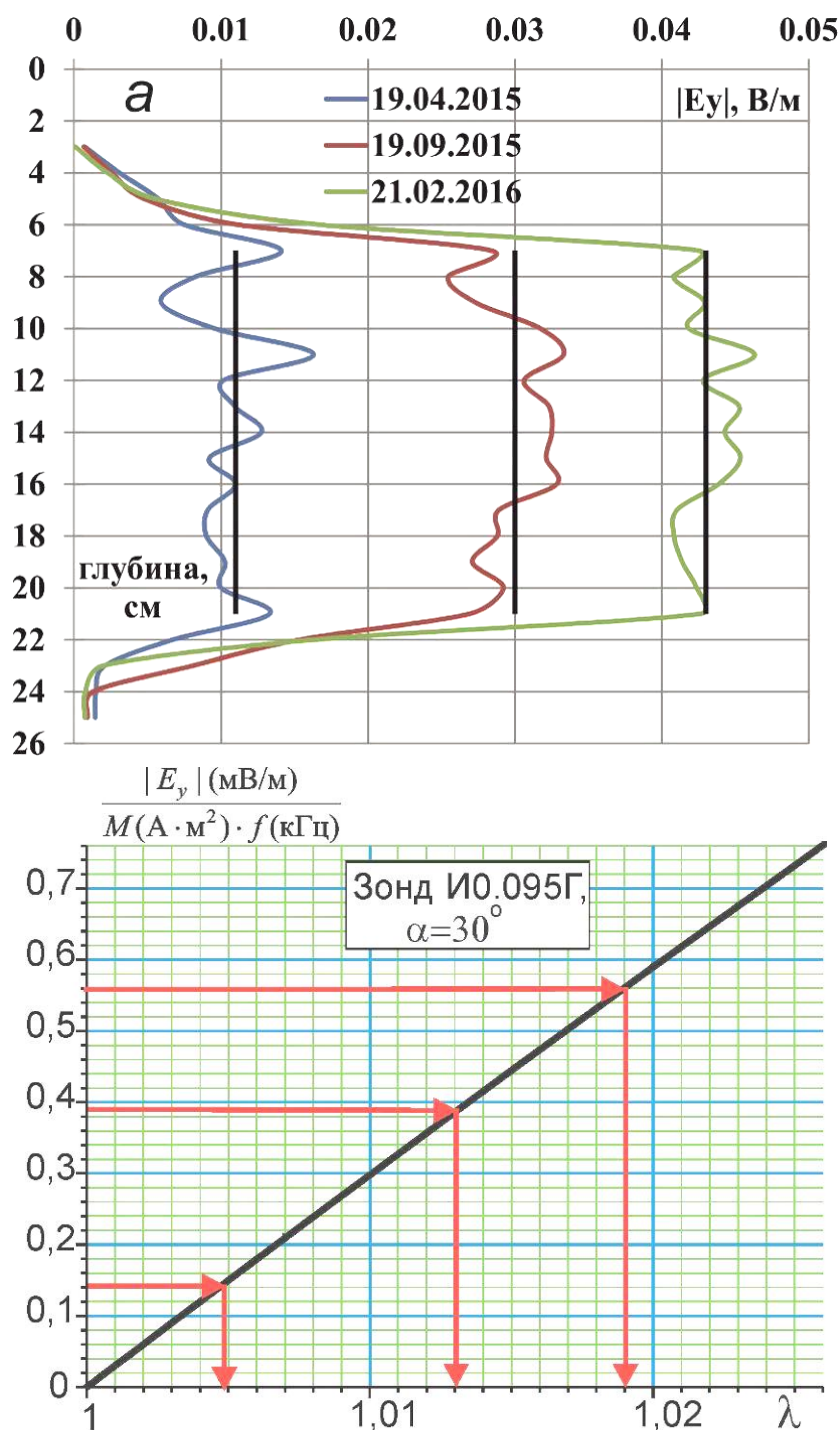
величина  $M$  была равна  $7.7 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

В разделе 4.2 «Примеры определения коэффициента анизотропии по данным физического моделирования» приведены примеры определения коэффициента  $\lambda$  моделей анизотропных пластов по экспериментальным кривым  $|E_y|$ . Для определения коэффициента  $\lambda$  послужили номограммы, показанные на рис. 10. На этом рисунке для отвечающих условиям экспериментов углов  $\alpha$  ( $30^\circ$  и  $45^\circ$ ) приведены зависимости  $|E_y|/(M \cdot f)$  от  $\lambda$  при разных пределах

В разделе 4.1 «Методика определения коэффициента анизотропии по экспериментальным данным» приведены полученные на основе расчётов для модели однородной анизотропной среды номограммы для определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по значению  $|E_y|$ , нормированному на произведение  $M \cdot f$ . Согласно приведенному выше выражению для  $|E_y|$  в однородной анизотропной среде, такое отношение ( $|E_y|/(M \cdot f)$ ) при  $|k_t| L \ll 1$  зависит только от коэффициента анизотропии  $\lambda$ , угла  $\alpha$  и длины зонда  $L$ . Поэтому для обоснования возможности определения коэффициента  $\lambda$  по результатам физического моделирования мы воспользовались тем, что известны не только длина  $L$ , значения  $M$  и  $f$ , но и угол  $\alpha$ . При сравнении результатов физического и математического моделирования было определено, что при физических экспериментах

изменения  $\lambda$ .  
 Номограммы на рис. 10,*а* и рис. 10,*б* получены на основе расчётов для модели однородной анизотропной среды для зонда ИО.095Г. На первом из этих рисунков (рис. 10,*а*) видно, что при аномально-высоких значениях коэффициента  $\lambda$  (больших, чем несколько единиц) количественное определение  $\lambda$  по величине  $|E_y|$  невозможно. Вторая номограмма (рис. 10,*б*) позволяет определить коэффициент  $\lambda$ , в тех случаях, когда этот коэффициент лишь немного превышает единицу.

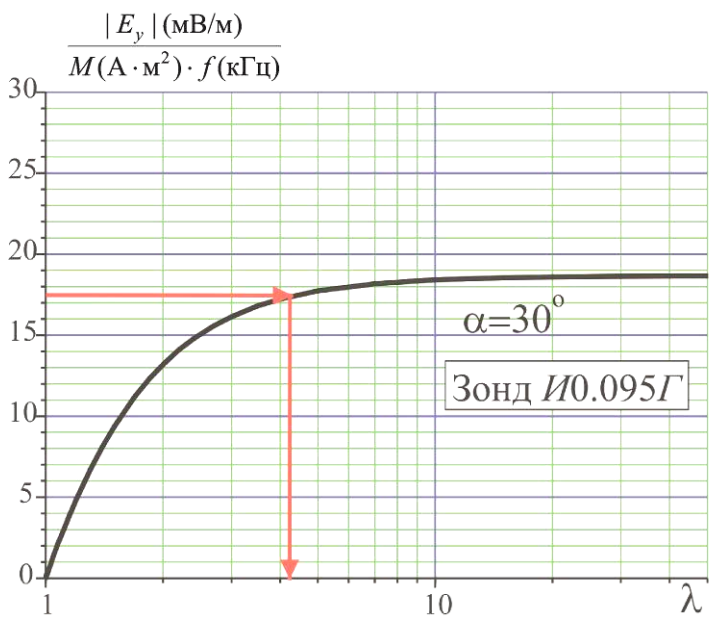
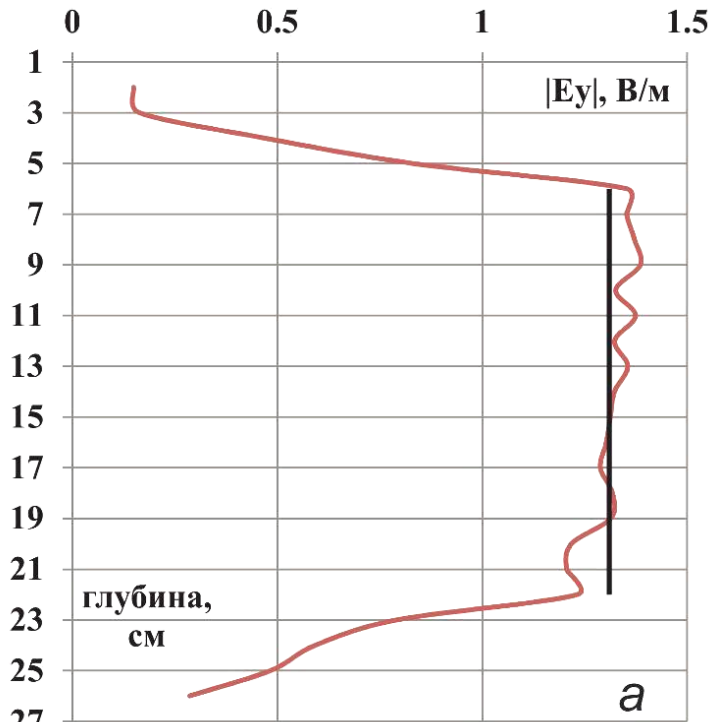
На рис. 11,*а* показаны три кривые  $|E_y|$  против модели пласта - результаты серии экспериментов для одной и той же модели анизотропного пласта из картона. Разница во времени получения этих трёх кривых составила приблизительно 5 месяцев. Вертикальными отрезками прямых линий показаны осредненные значения  $|E_y|$  против пласта. На рис. 11,*б* показано то, как, пользуясь номограммой, по значениям  $|E_y|$  можно определить коэффициент  $\lambda$ . Отметим, что приведенные на рис. 11 данные показывают следующее. Коэффициент анизотропии  $\lambda$  модели пласта из слоёв картона в воде растёт с продолжительностью нахождения такой модели пласта в воде. Эта информация может быть полезна исследователям, которые занимаются физическими экспериментами для моделей анизотропной среды.



**Рис. 11. Примеры определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  модели пласта из слоёв картона по значениям  $|E_y|$ .**

Три измерения проведены с интервалами 5 месяцев,  $f=10$  кГц





**Рис. 12. Пример определения, коэффициента анизотропии  $\lambda$  модели пласта из картона с ПЭТ (200 отв./м<sup>2</sup>) по значению  $|E_y|$**

единицам (рис. 12). Эти пределы изменения  $\lambda$  - типичны для большинства анизотропных горных пород.

### Заключение

Основные представленные в работе результаты исследований можно охарактеризовать следующим образом.

Рассмотрены вопросы практического применения определённых при геофизических исследованиях скважин электрических параметров

На рис. 12,а – показана кривая  $|E_y|$ , полученная против модели анизотропного пласта картон с ПЭТ, где в ПЭТ пленке были проделаны отверстия (с плотностью 200 отверстий на квадратный метр). Осреднённое значение величины  $|E_y|$  против этой модели пласта равно 1.3 В/м. На рис. 12,б по вертикальной оси отложено нормированное на магнитный момент генераторного диполя (7.7 А·м<sup>2</sup>) и частоту (10 кГц) значение равно 17.4 (мВ/м)/(А·м<sup>2</sup>·кГц). По горизонтальной оси на рис. 12,б определяем, что значение  $\lambda \approx 4.2$ .

Показанные на рис. 11 и 12 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  $\lambda$  лишь немного больше единицы (рис. 11), так и в тех случаях, когда коэффициент анизотропии равен первым

анизотропных горных пород, в частности, коэффициента анизотропии  $\lambda$ . Данные о коэффициенте  $\lambda$  могут оказать помощь при решении некоторых задач, как в промысловой, так и в рудной геологии. В настоящее время при изучении геолого-геофизических параметров тонкослоистых и сложнопостроенных коллекторов углеводородов нашёл применение имеющий сложную конструкцию зонд компании Schlumberger, специально предназначенный для определения параметров электрической анизотропии пород. В рудной геологии определению параметров электрической анизотропии пока уделяют мало внимания. Но, вместе с тем, аномальные значения коэффициента электрической анизотропии могут быть связаны с локализацией некоторых видов рудных полезных ископаемых.

Для проведения экспериментальных исследований сконструированы оригинальные лабораторные установки. Созданы модели пройденных скважиной анизотропных пластов и прототип зонда электромагнитного каротажа новой конструкции. Для такого зонда впервые получены экспериментальные данные. Принят ряд мер с целью уменьшения влияния помех на результаты измерений.

Физическое моделирование было проведено для трёхмерных моделей среды. Сравнение результатов этого моделирования с полученными ранее данными математического моделирования для более простых моделей среды показало следующее. Присутствие проводящей скважины не оказывает значительного влияния на те закономерности, которые были установлены на основе численных расчётов. Определяемая по результатам измерений величина  $|E_y|$  растёт с увеличением коэффициента  $\lambda$ , частоты  $f$  и т. д.

На экспериментальных данных опробована методика определения коэффициента анизотропии  $\lambda$  по полученным на основе расчётов номограммам. Установлено, что по величине  $|E_y|$  на оси переменного магнитного диполя коэффициент  $\lambda$  можно определить даже в тех случаях, когда он на десятые доли процента превышает единицу. При аномально-высоких значениях коэффициента  $\lambda$  его количественное определение невозможно; можно лишь сделать вывод, что коэффициент  $\lambda$  - больше нескольких единиц.

Полученные при проведении исследования результаты способствуют развитию методики геофизических исследований скважин и могут послужить основой для разработки и создания зондов электромагнитного каротажа новой конструкции. По нашему мнению, дальнейшим направлением исследований по этой тематике может быть создание габаритного макета зонда и проведение измерений с этим зондом в скважинах.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

*В изданиях рекомендованных ВАК.*

1. **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.

2. **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.

*Прочие издания.*

1. **Красносельских А. А.** Физические предпосылки измерения компоненты  $ImE_u$  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.

2. **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.

3. **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), 13 С.; <http://www.georazrez.ru/issue-archive/2015/15/>.

4. **Красносельских А.А.** Лабораторное моделирование зонда электромагнитного каротажа новой конструкции. II Научно-практическая конференция «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» материалы конференции, Новосибирск, 2015, том 2, С. 62-63.

5. **Красносельских А.А.** Лабораторное моделирование нового зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород. Тезисы доклада. // VIII научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием ГЕОЛОГИЯ В РАЗВИВАЮЩЕМСЯ МИРЕ. Пермь, 2015, С. 303-306.

6. **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.

7. **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.

8. **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.