

ОПЫТ ЛАБОРАТОРНОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НОВОГО ЗОНДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД

А.А.Красносельских

ФГУП Центральный научно-исследовательский
геологоразведочный институт цветных
и благородных металлов, г. Москва

А.Д.Каринский

Российский государственный геологоразведочный
университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва

Проведены теоретические и экспериментальные исследования нового зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород, пройденных скважиной.

Ключевые слова: математическое моделирование, лабораторное моделирование, электромагнитный каротаж, электрическая анизотропия, геофизические исследования.

Удельное электрическое сопротивление ρ электрически анизотропной среды зависит от направления. Анизотропия горных пород может быть обусловлена трещиноватостью, рассланцованностью, тонкослоистой структурой, а также присутствием включений, отличающихся по ρ от вмещающей среды и имеющих какую-либо преимущественную ориентацию. В геофизике для описания электрических параметров анизотропных горных пород обычно используют модель среды с осевой анизотропией. Удельное электрическое сопротивление такой среды характеризуют два значения: ρ_n по оси анизотропии n (ориентированной, например, по нормали к напластованию тонкослоистых пород) и ρ_t по любому направлению t ортогональному оси n (рис. 1). Коэффициент анизотропии λ определяет выражение

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}.$$

Параметры электрической анизотропии содержат важную геолого-геофизическую информацию о строении и свойствах пород, слагающих анизотропную толщу. Так, продольное и поперечное удельные электрические сопротивления

по-разному зависят от фильтрационно-емкостных свойств пород, характера их насыщения и др. По условиям геофизические исследования скважин (ГИС) более благоприятны для изучения электрических параметров анизотропных горных пород, чем наземные геофизические измерения, так как возбудители и измерители поля (датчики) находятся непосредственно в толще. Однако применяемые в настоящее время электрические и электромагнитные методы ГИС не позволяют получать полную информацию об электрических параметрах анизотропных пород, в первую очередь о значениях λ и ρ_n . Международным (и многочисленным) коллективом ученых и инженеров был разработан многокомпонентный зонд индукционного каротажа, имеющий три генераторные антенны с взаимно ортогональными моментами и три измерительные [8, 10]. Теоретические исследования одного из авторов показали, что для определения коэффициента анизотропии горных пород может быть применен зонд электромагнитного каротажа новой конструкции. У него, как у зондов индукционного каротажа ИК, электромагнитное (ЭМ) поле возбуждает ге-

нераторная антенна Γ в виде замкнутого витка гармонически изменяющегося тока I или «катушка» из таких витков. При малых линейных размерах Γ по сравнению с расстояниями от Γ до «измерителей поля» (датчиков) $И$ ее можно аппроксимировать переменным магнитным диполем с магнитным моментом $\mathbf{M}$. Если, как в методе ИК, конструкция датчика $И$ аналогична генераторной антенне Γ , то измеряемое напряжение электрического поля в датчике пропорционально компоненте магнитного поля $\mathbf{H}$ (точнее – скорости ее изменения) по оси датчика $И$. Но при возбуждении ЭМ поля при помощи переменного магнитного диполя датчиком может служить также короткая измерительная линия MN с электродами M, N , как при каротаже сопротивления (КС). В этом случае напряжение электрического поля $\mathbf{E}$ в линии MN пропорционально компоненте поля $\mathbf{E}$ по направлению линии MN .

Гальваническую (кулонову) составляющую поля $\mathbf{E}$ создают электрические заряды. В изотропных кусочно-однородных моделях среды это поверхностные заряды на границах различающихся по ρ областей среды. Но в анизотропной среде, даже если она однородна, могут существовать объемные заряды. Если ось Z декартовых координат ориентирована по оси анизотропии n , то объемную плотность δ этих зарядов определяет выражение

$$\delta = \epsilon_0 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \frac{\partial E_z}{\partial z},$$

где $\epsilon_0 \approx 10^9 / (36\pi)$ Ф/м – электрическая постоянная [9]. Согласно этому выражению, $\delta \neq 0$, если $\lambda \neq 1$ (анизотропная среда) и компонента поля $\mathbf{E}$ меняется по оси анизотропии. В работах [1–3] показано, как распределяются заряды в анизотропной среде при разных способах возбуждения поля $\mathbf{E}$.

Влияние параметров электрической анизотропии на одну из компонент поля $\mathbf{E}$ на оси переменного магнитного диполя в однородной анизотропной среде. Пусть Γ – центр переменного магнитного диполя, а момент $\mathbf{M}$ диполя лежит в плоскости $y=0$ декартовых координат x, y, z (рис. 2). Модель среды – однородная анизотропная с осью анизотропии n по направлению оси Z . Датчиком служит ортогональная плоскос-



Рис. 1. Анизотропная горная порода

ти рисунка короткая измерительная линия с центром $И$ в плоскости $y=0$. Напряжение в этой линии зависит от компоненты E_y поля $\mathbf{E}$ в плоскости $y=0$. На рисунке L – «длина зонда» (расстояние между точками Γ и $И$), α – угол между отрезком L прямой и осью анизотропии n .

В работе [3] приведены выражения для компонент гармонически изменяющегося ЭМ поля магнитного диполя в однородной немагнитной электрически анизотропной среде. Показано, в частности, что если ЭМ поле – квазистационарное, а точка $И$ расположена в ближней зоне возбуждителя поля, то при $\alpha \neq 0$ комплексные амплитуды компоненты E_y в точке $И$ определяют следующие простые выражения:

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

где $M = |\mathbf{M}|$; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота, Гц; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; i – мнимая единица; $\text{Re}E_y$, $\text{Im}E_y$ – составляющие компоненты E_y , первая из которых изменяется со временем синхронно с изменением момента M , а вторая запаздывает относительно M по фазе на $\pi/2$.

Возможно, требуют пояснения два термина, упомянутые в предыдущем абзаце. У квазистационарного ЭМ поля пропорциональная диэлектрической проницаемости среды ϵ плотность токов смещения пренебрежимо мала по сравнению с плотностью токов проводимости, обрат-

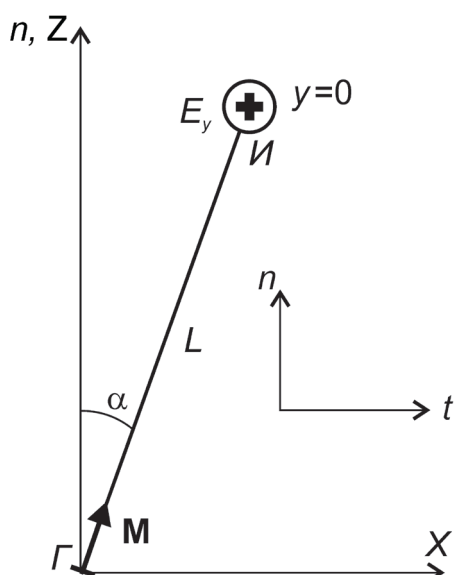


Рис. 2. Взаимное расположение оси анизотропии n и зонда

но пропорциональной удельному электрическому сопротивлению ρ . При не очень высоких частотах ЭМ поля (до десятков – сотен килогерц) в проводящих горных породах это условие, как правило, справедливо. В этом случае влияющим на ЭМ поле электрическим параметром среды является только ρ (или удельная электропроводность $\sigma=1/\rho$). Если «точка наблюдения» $И$ расположена в ближней зоне возбуждителя $Г$ ЭМ поля (см. рис. 2), то справедливы неравенства

$$|k_{n,t}|L \ll 1, \quad |k_{n,t}| = \sqrt{(\omega\mu_0)/\rho_{n,t}}, \quad (2)$$

где (в немагнитной среде, в квазистационарном приближении) волновые числа $k_{n,t} = [(i\omega\mu_0)/\rho_{n,t}]^{1/2}$.

Из выражений (1) следует, что при выполнении указанных выше условий и заданном M компонента $\text{Re}E_y$ в точке $И$ зависит от коэффициента анизотропии λ , угла α и продольного удельного электрического сопротивления ρ_t . Компонента $\text{Im}E_y$ зависит только от λ и α . То, как можно этим воспользоваться, показано на рис. 3. Палетка позволяет определить λ при известных $\text{Im}E_y$ и угле α . Величина $\text{Im}E_y$ нормированная на первичное магнитное поле H^0 [4] в точке $И$ отложена по вертикальной оси. Шифр кривых – значения коэффициента анизотропии λ . Отметим, что кривые, соответствующие двум (различающимся в 10 раз) значениям ρ_t на рисун-

ке, практически совпадают, что согласуется с приведенным выше выражением (1) для компоненты $\text{Im}E_y$ в ближней зоне. Согласно ему, компонента $\text{Im}E_y$ в ближней зоне не зависит от ρ_t .

Из выражений (1) следует такое отношение амплитуд компонент $\text{Re}E_y$ и $\text{Im}E_y$:

$$\frac{|\text{Re}E_y|}{|\text{Im}E_y|} = \frac{|k_t|^2 L^2}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} + \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) \cos(2\alpha)}, \quad (3)$$

где волновое число

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

Согласно равенствам (2), (3), в ближней зоне при $|k_t|L \ll 1$ амплитуда $|\text{Im}E_y| \gg |\text{Re}E_y|$ и, следовательно, для амплитуды $|E_y|$ компоненты E_y получаем:

$$\text{при } |k_t|L \ll 1 \quad |E_y| = \sqrt{(\text{Re}E_y)^2 + (\text{Im}E_y)^2} \approx |\text{Im}E_y|. \quad (4)$$

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 при лабораторном моделировании.

Результаты математического моделирования при конечной мощности анизотропных пластов. Для определения влияния границ пластов на компоненту E_y на оси переменного магнитного диполя было получено решение прямой задачи электродинамики о поле переменного магнитного диполя с произвольно ориентированным моментом M для следующей модели среды. Две горизонтальные плоскости делят пространство на три области – V_1, V_2, V_3 . Изотропные полупространства V_1 и V_3 с удельным электрическим сопротивлением $\rho_{\text{вм}}$ вмещают занимающий область V_2 анизотропный пласт (плоскопараллельный слой) с вертикальной осью анизотропии n и мощностью H . Электрические параметры пласта: ρ_t, ρ_n и $\lambda = (\rho_n/\rho_t)^{1/2}$.

В полученном решении прямой задачи выражения для компонент ЭМ поля имеют вид несобственных интегралов в смысле главного значения. Подынтегральные функции содержат функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков и экспоненты. На основе этого решения разработаны алгоритмы расчета, составлены компьютерные программы и проведено математическое моделирование, результаты ко-

торого даны на рис. 4. Показаны две зависимости $|E_y|/H^n$ от «вертикальной» координаты z относительно середины пластов одинаковой мощности H и с одинаковым коэффициентом анизотропии λ , но разными значениями параметров ρ_t и ρ_n . За «точку записи» зонда принята точка И. Видно, что вблизи границ пласта кривые $|E_y|$ могут быть осложнены экстремумами. Причиной этого, конечно, является влияние электрического поля поверхностных зарядов, индуцированных на границах пласта.

В работе [2] показано, от чего зависит поверхностная плотность Σ зарядов на границе анизотропной и изотропной сред. При прочих одинаковых условиях для описанной выше модели анизотропного пласта значение $|\Sigma|$ тем выше, чем больше (по абсолютной величине) коэффициент контрастности $(\rho_n - \rho_{\text{вм}})/(\rho_n + \rho_{\text{вм}})$. Поэтому на рис. 4 при $\rho_n = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{вм}} = 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ кривая черного цвета имеет более сложную конфигурацию вблизи границ пласта, чем при $\rho_n = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_{\text{вм}} = 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Ниже сформулированы самые значимые выводы, которые были сделаны на основе анализа расчетов для 1D-модели анизотропного пласта конечной мощности:

если мощность H анизотропного пласта в 3–4 раза превышает длину L зонда (см. рис. 2), то по измерению компоненты E_y ЭМ поля на оси переменного магнитного диполя против средней части пласта можно определить величину E_y , которая практически не зависит от влияния ограниченной мощности пласта (точнее – от влияния поля зарядов индуцированных на границах пласта);

при выполнении этого условия для определения коэффициента анизотропии λ пласта можно воспользоваться полученными для модели однородной анизотропной среды номограммами, одна из которых представлена на рис. 3. Приведем пример. На рис. 4 при $\lambda = 2$, но при разных значениях ρ_t и ρ_n против средней части пластов отношение $|E_y|/H^n \approx 0,0075 \text{ Ом}$. При этом значении $|E_y|/H^n$ и при $\alpha = 30^\circ$ по приведенной на рис. 3 номограмме (учитывая условие (4)) определяем $\lambda \approx 2$, что совпадает с величиной этого параметра у моделей пластов на рис. 4;

при удалении зонда от анизотропного пласта (и расположении зонда в модели изотропного

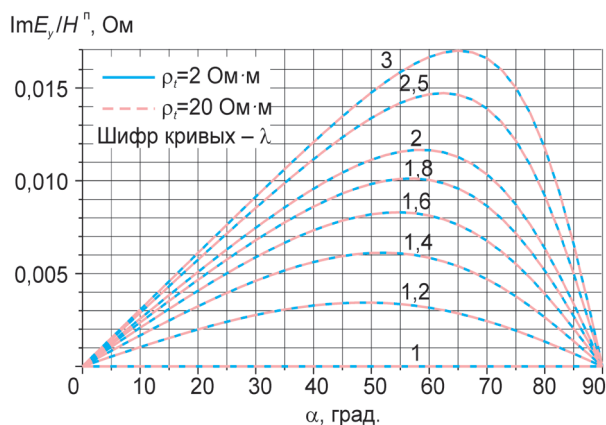


Рис. 3. Палетка для определения коэффициента анизотропии λ по значениям $\text{Im}E_y$ и α :

$f = 10 \text{ кГц}$, $L = 1 \text{ м}$

пласта большой мощности с $\rho = \rho_{\text{вм}}$) компонента $E_y \rightarrow 0$.

При геофизических исследованиях скважин значительное влияние на результаты измерений могут оказывать их физические и геометрические параметры. Теоретическое изучение этого влияния потребовало бы разработки весьма сложных алгоритмов численного решения прямых задач электродинамики для трехмерных моделей среды. Поэтому, чтобы определить возможность выявления анизотропных пластов при из-

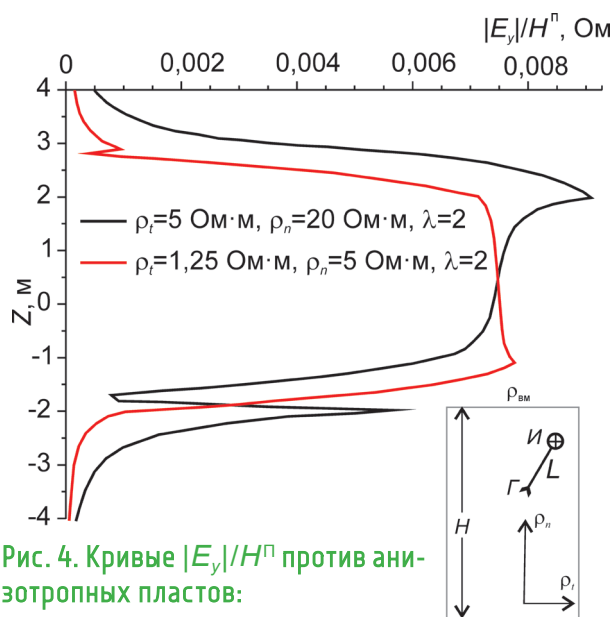


Рис. 4. Кривые $|E_y|/H^n$ против анизотропных пластов:

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

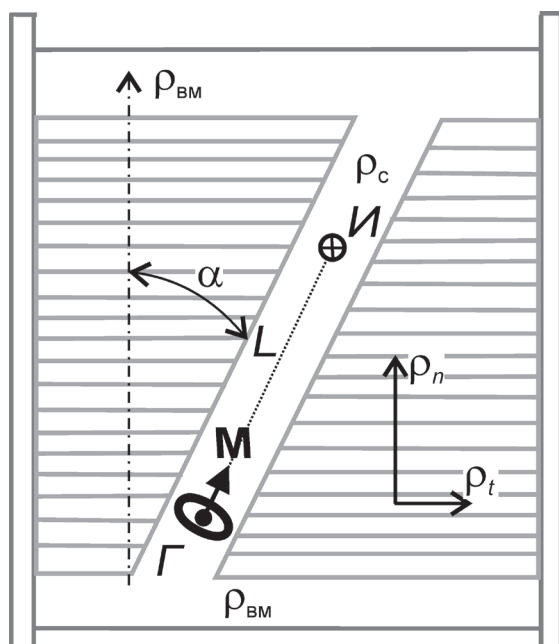


Рис. 5. Схема установки для лабораторного моделирования

мерениях в скважинах с помощью показанного на рис. 2 зонда, проведено лабораторное (физическое) моделирование.

Результаты лабораторного (физического) моделирования. Особенности влияния параметров анизотропной среды на поле E переменного магнитного диполя послужили основанием для лабораторного моделирования зонда электромагнитного каротажа новой конструкции. Первоначально предполагалось проводить измерения на модели полиэтилен/пенопласт – вода [5, 7]. Однако указанная модель обладала большими удельными электрическими сопротивлениями и коэффициентом анизотропии порядка $n \cdot 100 - n \cdot 1000$ единиц, что не соответствует типичным параметрам электрически анизотропных горных пород, и от нее отказались. Некоторые результаты моделирования были представлены на конференции [6].

На данном этапе исследований лабораторная модель анизотропного пласта сконструирована из картона. Вмещающую пласт среду и скважину в модели имитирует водопроводная вода. Лабораторное моделирование производится в пластиковом баке объемом 120 л, диаметром 450 мм, высотой 850 мм. Бак заполнен водо-

проводной водой, удельное электрическое сопротивление ($\rho_{вм}$, ρ_c) которой определено лабораторным резистивиметром и равно 30 Ом·м. На небольшой подставке (материал древесины) приблизительно на уровне середины бака находятся уложенные друг на друга слои картона, по форме отвечающие сечению бака. Толщина одного слоя картона 5 мм (влажное состояние), общее число слоев 30. В модели вода представляет собой вмещающие породы с низким удельным электрическим сопротивлением, а слои картона – слабоанизотропный пласт повышенного (100–150 Ом·м) удельного электрического сопротивления. Через все слои картона просверлено отверстие диаметром 20 мм под углом $\alpha = 30^\circ$ к нормали напластования (рис. 5).

Прототип зонда сконструирован в корпусе из пластика диаметром 10 мм, в нижней части которого закреплена многовитковая катушка, а в верхней – четыре электрода, образующих две пары – M , N и M' , N' . Катушка из медного провода диаметром 0,33 мм расположена на ферритовом сердечнике из материала с рабочим диапазоном частот 1–100 кГц. Расстояния между центрами электродов каждой из измерительных линий 18 мм. Электроды имеют форму полушарий диаметром 4 мм, материал свинец. Расстояние между центром генераторной катушки и серединами электрических измерительных линий с электродами M , N и M' , N' составляет 95 мм.

Зонд соединен с генераторным и измерительным блоками коаксиальным кабелем. Генераторный блок состоит из функционального генератора сигнала синусоидальной формы и колебательного контура, настраиваемого на резонанс при заданной индуктивности генераторной катушки в зонде и необходимой частоте резонанса. Параметры входящего сигнала (частота и амплитуда) измеряются с помощью цифрового осциллографа. Запись ведется непрерывно при спуске и подъеме прототипа зонда через соответствующее модели скважины отверстие. Низкая скорость перемещения зонда по модели (в среднем 5 м/мин) позволяет получать отсчеты с шагом 0,5–1 см.

С помощью выражений (1) произведена численная оценка возможной величины активной и

реактивной компонент поля E по оси Y . Пусть модуль магнитного момента диполя равен $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, угол наклона «скважины» относительно оси напластования $\alpha 30^\circ$, частота $f 10 \text{ кГц}$, длина зонда $L 0,095 \text{ м}$. Параметры анизотропного пласта: $\rho_t=150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\lambda=1,2$. Результат оценки модуля реактивной составляющей $|\text{Re}E_y|=3,55 \cdot 10^{-8} \text{ В/м}$, активной – $|\text{Im}E_y|=1,30 \cdot 10^{-1} \text{ В/м}$. Таким образом, $|\text{Im}E_y|$ больше, чем $|\text{Re}E_y|$, на много порядков и $|\text{Im}E_y| \approx |E_y|$.

Против слоя картона получена небольшая по амплитуде аномалия $|E_y|$ (рис. 6). Наличие локальных минимумов на кривой в толще картона обусловлено, по мнению авторов, неравномерным размоканием картона в воде и, соответственно, переменным коэффициентом анизотропии в центральной и приконтактных с водой областях.

В ходе экспериментов авторы столкнулись со следующими трудностями: высокий уровень промышленных помех, а также низкий уровень полезного сигнала на фоне отклика первичного поля. Анализируя спектр промышленных помех, нельзя не упомянуть о наличии электрических сетей, работающих на частоте 50 Гц . С развитием беспроводных средств коммуникации (радиосигнал теле- и радиовещательных станций, мобильная связь, портативные радиостанции, навигационное оборудование) частотный диапазон $1\text{--}100 \text{ кГц}$, выбранный нами, оказывается лишь формально свободным от вещания. «Диапазон низких частот» уже полностью входит в него, а с учетом эффекта Доплера принимаемая частота сигнала может быть ниже из-за изменения расстояния до передатчика. Для борьбы с промышленными помехами хороший результат может дать фильтрация измеряемого сигнала. Поскольку полезный сигнал имеет заранее определенную нами частоту (10 кГц), принято решение использовать фильтр с полосой пропускания в диапазоне от 9 до 11 кГц .

Что касается выделения полезного сигнала на фоне отклика первичного поля, то ситуация кардинально отличается от описанной выше. Так как сигнал и помеха имеют одинаковую частоту, применение фильтрации становится невозможным. Однако в лабораторных условиях можно решить поставленную задачу за счет заранее

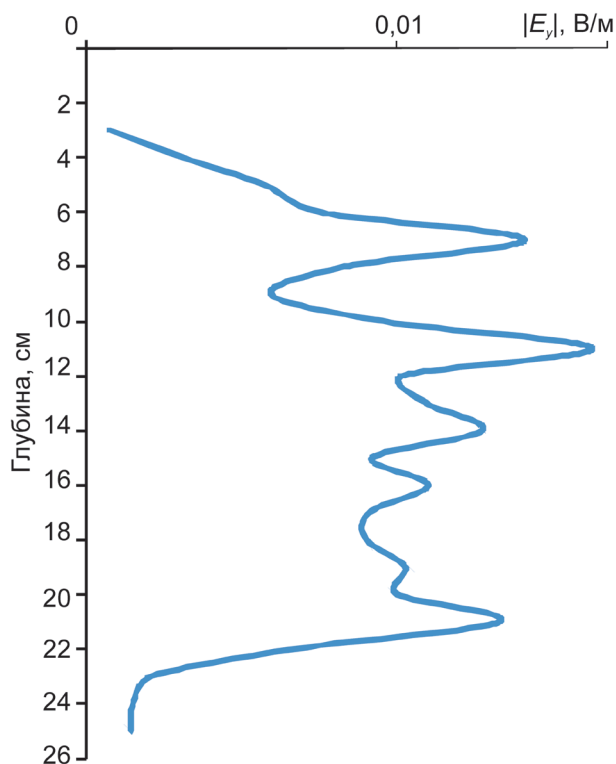


Рис. 6. Результаты измерения прототипом зонда И0,095Г, модель среды – картон

известных геометрических особенностей модели среды и зонда, а именно непосредственно перед измерениями провести простейшую калибровку зонда, попеременно ориентируя его приемные линии MN и $M'N'$ строго поперек оси напластования. При такой ориентировке (рис. 7, а) на линии MN измеряется только отклик первичного поля, на линии $M'N'$ – сумма полезного сигнала и отклика первичного поля. При повороте зонда на 90° (см. рис. 7, б) обе линии испытывают влияние отклика первичного поля, а полезный сигнал полностью фиксируется только на линии MN . Эта методика позволяет оценить уровень помехи генераторного магнитного диполя на измерительные линии и учесть ее при определении полезного сигнала $|E_y|$.

Результаты лабораторного (физического) моделирования:

слои картона в воде дают возможность моделировать пройденный скважиной слабоанизотропный пласт в изотропных вмещающих породах;

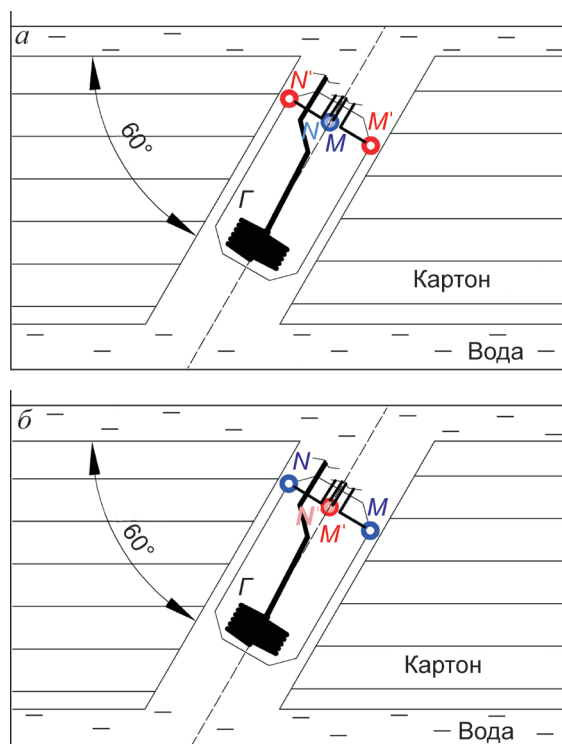


Рис. 7. Принципиальная схема учета отклика от генераторной катушки

прототип зонда ИО,095Г позволяет измерять аномальные значения $|E_y|$ против модели анизотропного пласта на фоне помех;

полезный сигнал имеет небольшие значения; для выделения его на фоне промышленных помех можно пользоваться полосовой фильтрацией и методикой учета отклика сигнала генераторной катушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каринский А.Д. Влияние анизотропии пластов на компоненты поля на оси переменного магнитного диполя // Тез. докл. VI Междунар. конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., 2003. Т. 2. С. 356.
2. Каринский А.Д. Индуцированные заряды в микро- и макроанизотропных средах и их влияние на электрическое поле в анизотропных пластах, пройденных скважиной // Геофизика. 2010. № 2. С. 37–48.
3. Каринский А.Д. Физические предпосылки измерения различных компонент поля в электромагнитном каротаже при изучении анизотропии пластов // Геофизика. 2002. № 4. С. 15–23.

4. Кауфман А.А. Теория индукционного каротажа. – Новосибирск: Наука, 1965.
5. Красносельских А.А. Лабораторное моделирование зонда электромагнитного каротажа новой конструкции // Тез. докл. VII Междунар. конференции «Молодые – наукам о Земле». М., 2014. Т. 1. С. 109–110.
6. Красносельских А.А. Лабораторное моделирование нового зонда электромагнитного каротажа, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии горных пород // Тез. докл. XII Междунар. научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., 2015. Т. 1. С. 494–495.
7. Красносельских А.А. Физические предпосылки измерения компоненты ImE_y в электромагнитном каротаже для изучения анизотропии пластов // Тез. докл. XI Междунар. конференции «Новые идеи в науках о Земле». М., 2013. Т. 1. С. 401–402.
8. A new multi-component induction logging to resolve anisotropic formation / B.Kriegshäuser, O.Fanini, S.Forgang et al. // SPWLA 41st Annual Logging Symposium. 2000. Paper D.
9. Kaufman A.A., Keller G.V. Induction logging // Methods in geochemistry and geophysics. 1989. Vol. 27.
10. Zhdanov M.S., Kennedy W.D., Chervauka A.B., Peksen E. Principles of tensor induction well logging in a deviated well in an anisotropic medium // SPWLA 42st Annual Logging Symposium. 2001. Paper R.

Красносельских Андрей Андреевич
andrey.krasnoselskikh@gmail.com

Каринский Александр Дмитриевич,
доктор физико-математических наук
akarinski@mail.ru

LAB AND MATH MODELING OF A NEW EM LOGGING PROBE FOR MEASURING THE ELECTRIC ANISOTROPY OF THE ROCKS

A.A.Krasnoselskikh,
A.D.Karinsky

The paper presents results of theoretical modeling and lab tests of a new EM probe for downhole measurement of the electric anisotropy of rocks.

Key words: math modeling, lab test, EM logging, electric anisotropy, geophysical research.