

УДК 550.837

ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ (ЗВТ)

© 1994 г. В. С. Могилатов, Б. П. Балашов

СНИИГГиМС, Новосибирск

Поступила в редакцию 23.07.93 г.

В статье развиваются основы нового электроразведочного метода – зондирования вертикальными токами (ЗВТ), основанного на применении кругового электрического диполя (КЭД). Предлагается математический аппарат для многослойных сред и обсуждаются результаты полевых экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [3] в теорию электроразведки был введен новый, третий тип источника – круговой электрический диполь (КЭД) в дополнение к ранее составлявшим основу электроразведочных методов с контролируемыми источниками магнитному и электрическому диполям.

Предложена техническая реализация, согласно [1], и разработан базовый математический аппарат для КЭД. Источник устраивается следующим образом. Один из полюсов генератора заземляется в центральной точке, а второй полюс заземляется равномерно по окружности с радиусом, определяемым в соответствии с требуемой глубиной исследования. Такой источник образует в земле тороидальную систему токов, замыкающихся в вертикальных плоскостях. Сходную конфигурацию поля имеет вертикальный электрический диполь (линия), заземляемый в скважине, но КЭД располагается на дневной поверхности. Математическое моделирование в различных геоэлектрических условиях показало высокую эффективность применения КЭД. Таким образом, можно говорить о новом электроразведочном методе.

Новизна КЭД, как источника тока, в его геометрии, поэтому он интересен при различных режимах возбуждения – в режиме постоянного тока, в гармоническом режиме или в режиме установления.

Имея в виду главную особенность поля КЭД – циркуляцию токов в вертикальных плоскостях и выраженный вертикальный характер токов под центральным электродом, мы будем всю совокупность методов, использующих круговой электрический диполь в качестве источника поля, называть методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

В этой работе развивается математический аппарат ЗВТ на случай произвольной горизонтально-слоистой среды при различных режимах возбуждения КЭД и обсуждаются результаты первых полевых экспериментов.

МНОГОСЛОЙНАЯ СРЕДА

В работе [3] мы определили условие в источнике и граничные условия для потенциала КЭД и, таким образом, создали предпосылки для решения другой важной, но уже более технической задачи – построить математическую модель установления поля КЭД в многослойной горизонтально-однородной среде.

Вначале решим задачу установления поля кругового электрического диполя в многослойной среде методом, который можно назвать методом устанавливающихся пространственных гармоник. Впервые предложен в работе [4] для горизонтального электрического диполя в двухслойной среде. Имеет то ограничение, что разрез должен иметь изолирующее или идеально проводящее основание.

Итак, для среды, изображенной на рис. 1, ищем решение, вводя потенциалы обычным для электрического источника образом:

$$\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A},$$

$$U = \rho \text{ div } \mathbf{A}.$$

В силу симметрии задачи достаточно иметь отличной от нуля только компоненту A_z , тогда в цилиндрической системе координат имеются

$$E_r = \rho \frac{\partial^2 A_z}{\partial r \partial z}, \quad H_\phi = -\frac{\partial A_z}{\partial r}, \quad E_z = -\mu \dot{A} + \rho \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}.$$

Компонента A_z должна удовлетворять достаточным условиям:

$$\Delta A_z = \frac{\mu}{\rho} \dot{A}_z, \quad 0 < z < H_N, \quad 0 \leq r \leq \infty;$$

$\rho \frac{\partial A_z}{\partial z}$ – непрерывно всюду, что означает $A_z(0) = A_z(H_N) = 0$; далее

$$A_z \rightarrow 0 \text{ при } \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty;$$

$$A_z \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty;$$

Среда и источник

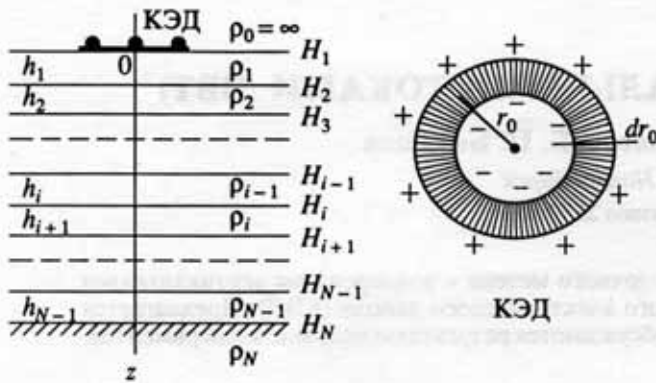


Рис. 1.

начальное условие – решение стационарной задачи.

Разделяя переменные в уравнении для A_z и учитывая условия для потенциала, будем искать решение в виде

$$A_z = \frac{I_r}{4\pi} \int_0^{\infty} J_0(mr) Z(m, z) dm, \quad (1)$$

где $I_r = I dr_0$ – имеет смысл величины момента.

Функция Z должна удовлетворять краевой задаче ($\rho_N = \infty$):

$$Z''_z - m^2 Z = \frac{\mu}{\rho} \dot{Z}, \quad 0 < z < H_N; \quad Z(0) = Z(H_N) = 0;$$

$$\left[\rho \frac{\partial Z}{\partial z} \right]_{z=H_i} = 0, \quad (2)$$

$$[Z]_{z=H_i} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N-1;$$

$$Z \rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow \infty;$$

$$Z \rightarrow Z_0 \quad \text{при } t \rightarrow 0,$$

где Z_0 – стационарное решение, т.е. до выключения, удовлетворяющее условиям:

$$Z''_{0z} - m^2 Z_0 = 0, \quad 0 < z < H_N; \quad Z_0 = Z_0(H_N) = 0;$$

$$\left[\frac{\partial Z_0}{\partial z} \right]_{z=z_0} = 0, \quad [Z_0]_{z=z_0} = 2J_1(mr_0); \quad (3)$$

$$\left[\rho \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right]_{z=H_i} = 0, \quad [Z_0]_{z=H_i} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N-1;$$

Решение этой задачи дает поле постоянного тока. Условие в источнике (при $z = z_0$) определяется выражением для потенциала в однородном неограниченном пространстве [3]:

$$U = -\frac{I_r \rho}{4\pi} \int_0^{\infty} J_1(mr_0) J_0(mr) m \exp(-m|z_0 - z|) dm. \quad (4)$$

Для поля установления будем искать решение краевой задачи (2) в виде

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} C_n X_n(z) e^{-\eta_n \frac{t}{\mu}}, \quad (5)$$

где $\eta_n = (m^2 + k_i^2) \rho_i$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$), а для X_n имеем (индекс n опускаем):

$$X''_z + k_i^2 X = 0, \quad 0 < z < H_N, \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \\ X(0) = X(H_N) = 0; \quad (6)$$

$$\left[\rho \frac{\partial X}{\partial z} \right]_{z=H_i} = 0, \quad [X]_{z=H_i} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N-1;$$

Получаем решение в виде

$$X_i(z) = A_i \cos(k_i z) + B_i \sin(k_i z), \\ X'_i(z) = -A_i k_i \sin(k_i z) + B_i k_i \cos(k_i z), \quad (7) \\ i = 1, 2, \dots, N-1.$$

Введем значения функции X и ее производной на границах раздела сред:

$$X(H_i) = \bar{X}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \\ X'_z(H_i) = \bar{X}'_i.$$

В силу однородности задачи положим

$$\bar{X}'_i = m \rho_i$$

и получим рекуррентные соотношения:

$$\bar{X}_{i+1} = \bar{X}_i c_i + \bar{X}'_i s_i \frac{1}{\rho_i}, \quad (8)$$

$$\bar{X}'_{i+1} = -\bar{X}_i k_i^2 s_i \rho_i + \bar{X}'_i c_i,$$

где

$$s_i = \sin(k_i h_i) / k_i,$$

$$c_i = \cos(k_i h_i),$$

$$h_i = H_{i+1} - H_i - \text{мощности слоев.}$$

Теперь

$$X_i(z) = \bar{X}_i \cos[k_i(H_i - z)] - \bar{X}'_i \sin[k_i(H_i - z)] / (k_i \rho_i), \\ X'_z(z) = \bar{X}_i k_i \sin[k_i(H_i - z)] \rho_i + \bar{X}'_i \cos[k_i(H_i - z)], \quad (9) \\ i = 1, 2, \dots, N-1.$$

Заметим, что k_i может принимать мнимые значения, тогда вещественное тригонометрическое решение переходит в вещественное гиперболическое решение.

Наконец, условие при $z = H_N$ дает уравнение для η :

$$\bar{X}_N = 0. \quad (10)$$

Таким образом, задача для функций X_n решена, определены также функции $\eta_n(m)$.

Остается определить весовые коэффициенты $C_n(m)$ для ряда (5). Они должны удовлетворять начальному условию для функции $Z(z, t, m)$:

$$Z(z, 0, m) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n(m) X_n(z, m) = Z_0(z, m). \quad (11)$$

Удовлетворяя этому условию, используя свойства функций X_n как решений краевой задачи (6) и свойства функции Z_0 как решения задачи (3), получим:

$$C_n = [4\rho_1 m j_1(mr)] \left(\eta_n \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ h_i \left[\bar{X}_{ni}^2 + \bar{X}_{ni}'^2 \frac{1}{k_{ni}^2 \rho_i^2} \right] - \frac{1}{k_{ni}^2 \rho_i} [\bar{X}_{n(i+1)} \bar{X}_{n(i+1)}' - \bar{X}_{ni} \bar{X}_{ni}'] \right\} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Определенные здесь коэффициенты C_n соответствуют положению источника на дневной поверхности. Напоминаем, что индекс n относится к суммированию ряда (5) для функции Z , а индекс i – номер слоя среды.

Рассмотрим теперь поле КЭД при гармоническом возбуждении. Гармонический режим представляет интерес сам по себе, он дает возможность получить режим становления с помощью преобразования Фурье и проверить расчеты по полученному выше алгоритму, он не имеет ограничений на проводимость основания, наконец позволяет учесть частотную дисперсию удельных сопротивлений и, таким образом, рассчитать поле ВП.

Используем ту же модель геоэлектрического разреза и систему координат, что и выше (рис. 1). В источнике теперь ток меняется по закону

$$I(t) = I_0 e^{-i\omega t}. \quad (13)$$

Мы должны рассмотреть уравнения Максвелла в виде

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{E}/\rho + \mathbf{j}_{\text{стр}}, \\ \text{rot } \mathbf{E} &= i\omega\mu\mathbf{H}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\rho \equiv \rho(z)$ – кусочно-постоянна.

В нашем случае плотность стороннего тока отлична от нуля при $z = z_0, r = r_0$, причем имеется только

$$\left(\frac{\mathbf{j}_{\text{стр}}}{\Delta z} \right)_r = \frac{I_0}{2\pi r_0 \Delta z}. \quad (15)$$

Задача обладает осевой симметрией, имеются только E_r, E_z и H_ϕ , так, что уравнения Максвелла

в цилиндрической системе координат принимают вид (кроме $z = z_0, r = r_0$):

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_\phi}{\partial z} &= \frac{E_r}{\rho}, \quad \frac{H_\phi}{r} + \frac{\partial H_\phi}{\partial r} = \frac{E_z}{\rho}, \\ \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= i\omega\mu H_\phi. \end{aligned} \quad (16)$$

Предложим всюду, кроме точки ($z = z_0, r = r_0$), решение в виде:

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{I_0 dr_0 \rho}{4\pi} \int_0^\infty J_1(mr) m R(m, z) dm, \\ E_z &= -\frac{I_0 dr_0 \rho}{4\pi} \int_0^\infty J_0(mr) Z(m, z) dm, \\ H_\phi &= -\frac{I_0 dr_0}{4\pi} \int_0^\infty J_1(mr) m F(m, z) dm. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда для функций R, Z, F получим систему уравнений:

$$F_z' = R, \quad R_z' - Z = -\frac{i\omega\mu}{\rho} F, \quad Z = m^2 F, \quad (18)$$

или уравнение для F

$$F_{zz}'' - \left(m^2 - \frac{i\omega\mu}{\rho} \right) F = 0. \quad (19)$$

Поскольку всюду непрерывна функция E_z/ρ , значит непрерывны Z и F (на дневной поверхности $F = 0$). Функция $R\rho$ всюду непрерывна, значит непрерывна $F_z\rho$. При $z = z_0$ (условие в источнике)

$$\left[\frac{\partial F}{\partial z} \right]_{z=z_0} = 0, \quad [F]_{z=z_0} = 2J_1(mr_0). \quad (20)$$

Итак, для функции F имеем следующую задачу:

$$\begin{aligned} F_{zz}'' - n^2 F &= 0, \quad 0 \leq z \leq \infty, \\ F(0) &= 0, \quad F(\infty) = 0, \end{aligned}$$

$$\left[\frac{\partial F}{\partial z} \right]_{z=z_0} = 0, \quad [F]_{z=z_0} = 2J_1(mr_0), \quad (21)$$

$$\left[\frac{\partial F}{\partial z} \rho \right]_{z=H_i} = 0, \quad [F]_{z=H_i} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, N,$$

$$n^2 = m^2 - i\omega\mu/\rho.$$

В i -м слое

$$\begin{aligned} F_i(z) &= A_i e^{n_i z} + B_i e^{-n_i z}, \\ F_{zi}'(z) &= A_i n_i e^{n_i z} - B_i n_i e^{-n_i z}. \end{aligned} \quad (22)$$

Обозначим

$$X_i = F_{i-1}(H_i) = F_i(H_i),$$

$$Y_i = \rho_{i-1} F_{i-1}(H_i) = \rho_i F_i(H_i).$$

Тогда X_i , Y_i и X_{i+1} , Y_{i+1} будут связаны рекуррентными соотношениями:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i \operatorname{ch}(n_i h_i) + Y_i \frac{\operatorname{sh}(n_i h_i)}{n_i \rho_i}, \\ Y_{i+1} &= X_i n_i \rho_i \operatorname{sh}(n_i h_i) + X_i \operatorname{ch}(n_i h_i), \\ X_i &= X_{i+1} \operatorname{ch}(n_i h_i) - Y_{i+1} \frac{\operatorname{sh}(n_i h_i)}{n_i \rho_i}, \\ Y_i &= -X_{i+1} n_i \rho_i \operatorname{sh}(n_i h_i) + Y_{i+1} \operatorname{ch}(n_i h_i). \end{aligned} \quad (23)$$

В верхнем полупространстве

$$F_0 = A_0 e^{n_0 z}, \quad X_1 = A_0,$$

$$F'_{z_0} = A_0 n_0 e^{n_0 z}, \quad Y_1 = A_0 n_0 \rho_0,$$

в нижнем полупространстве

$$F_N = A_N e^{-n_N(z-H_N)}, \quad X_N = B_N,$$

$$F'_{z_0} = -B_N n_N e^{-n_N(z-H_N)}, \quad Y_1 = -B_N n_N \rho_N.$$

Определим также функцию

$$W_i = \frac{X_i}{Y_i}, \quad (24)$$

так, что

$$W_i = \frac{W_{i+1} n_i \rho_i \operatorname{ch}(n_i h_i) - \operatorname{sh}(n_i h_i)}{-W_{i+1} n_i \rho_i \operatorname{sh}(n_i h_i) + \operatorname{ch}(n_i h_i)} \frac{1}{n_i \rho_i}.$$

На дневной поверхности отлична от нуля только компонента E_r , т.е. нужно определить

$$R \rho_1 = F'_z \rho_1 = Y_1.$$

Учитывая условия на верхней границе и условие (20) при $z = z_0$ и полагая $z_0 = 0$, получим, что

$$Y_1 = \frac{2J_1(mr_0)}{W_1}. \quad (25)$$

Итак, на дневной поверхности

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{I_0 dr_0}{4\pi} \int_0^\infty J_1(mr) J_1(mr_0) \frac{m}{W_1} dm, \\ H_\varphi &= 0, \quad E_z = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Для источника конечных размеров, заземленного одним полюсом в центральной точке и другим полюсом по окружности радиуса r_0 , и при измерении разности потенциалов приемной линией, располагаемой от r_1 до r_2 , выражение (26) нужно проинтегрировать по r_0 и по r , и мы получим:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{I_0}{4\pi} \int_0^\infty (J_0(mr_2) - J_0(mr_1)) (1 - J_0(mr_0)) \frac{1}{W_1 m} dm. \quad (27)$$

Преобразование Фурье этого выражения позволяет получить режим установления. Этот алгоритм реализован в виде программы для персонального компьютера (как и решение по методу устанавливаемых пространственных гармоник). Приводим здесь результаты сопоставления расчетов, выполненных по двум алгоритмам. На рис. 2 представлены кривые ρ_r . Расхождения (на рисунке, в принятом здесь масштабе, они не отражаются) имеют место на ранних временах, где, как известно, лучше работает частотный подход. В целом использование двух алгоритмов позволяет надежно контролировать расчет теоретических кривых.

О РАСЧЕТЕ ПОЛЯ ВП

Выше, в рамках электродинамического подхода мы предложили алгоритмы расчета полей, возбуждаемых круговым электрическим дипо-

Параметры модели		
номер слоя	удельное сопротивление (Ом м)	мощность слоя (м)
1	200	100
2	10	400
3	5	1950
4	20	20
5	5	160
6	1	20
7	5	100
8	∞	∞

Радиус КЭД – 500 м
MN – 500 м - 1000 м
Ток – 50 А

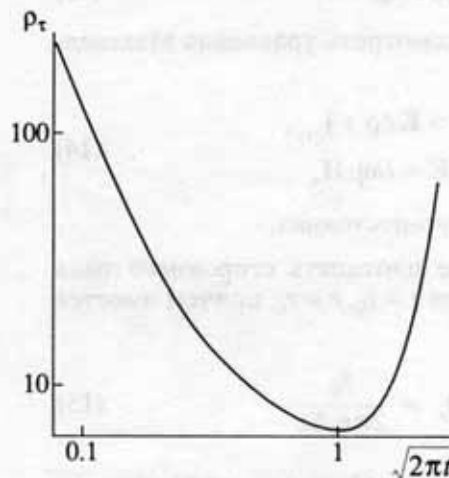


Рис. 2.

лем, на постоянном токе, в гармоническом режиме и в режиме установления. Однако КЭД – электрический заземляемый источник и реальный отклик, принимаемый заземленной линией, будет содержать в себе и сигнал ВП. При интерпретации такого отклика возможны два подхода. Первый состоит в том, чтобы методическими ухищрениями отделить электродинамическую составляющую и интерпретировать ее, пользуясь предложенным выше аппаратом. Вторым путем состоит в применении математических средств, позволяющих моделировать полный сигнал.

Распространенным приемом учета поля ВП, имеющим феноменологический характер, является определение удельных сопротивлений как функций частоты. Эти функции получены при изучении образцов горных пород, и предполагается, что эта зависимость сохраняется при воздействии источника поля на геоэлектрическую среду. Например, в [2] предлагается следующая зависимость:

$$\rho(i\omega) = \frac{\rho}{1-\eta} \left[1 - \eta \frac{(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right], \quad (28)$$

где τ – характерное время релаксации, η – стационарная поляризуемость, c – постоянная (от 0.1 до 0.6 для различных горных пород).

Эти параметры меняются в широких пределах, кроме того, роль ВП в зондированиях с установкой КЭД еще предстоит выяснить в полевых экспериментах. Укажем только, что в алгоритм расчета устанавливаемого поля, получаемого преобразованием гармонического режима, очень просто “вмонтировать” зависимость удельного сопротивления от частоты и рассчитывать суммарный сигнал становления и ВП.

КАЖУЩЕЕСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Современный подход к интерпретации электроразведочных данных состоит в сопоставлении результатов наблюдений и результатов математического моделирования эксперимента при максимальном учете предполагаемой геоэлектрической модели среды. Для сред с горизонтальными границами раздела возможно организовать быстрый диалоговый режим с использованием персональных компьютеров, включая и автоматизированное решение обратной задачи для многослойных сред. Наш подход к интерпретации ЗВТ состоит именно в этом.

Однако следуя традиции и учитывая необходимость некоторой визуализации информации, содержащейся в кривых наблюдаемого поля, что является полезным при интерпретации в диалоговом режиме, введем кажущееся удельное сопротивление, используя позднюю стадию становле-

ния КЭД в полупространстве, которую мы получили в следующем виде:

$$\epsilon(t) = K \frac{I_0 r_0^2 \rho (r_2^2 - r_1^2)}{\left(\frac{8\pi^2 t \rho}{\mu} \right)^{5/2}}, \quad (29)$$

где I_0 – ток источника, r_0 – радиус генераторной установки, r_1, r_2 – положения заземлений приемной линии, K – коэффициент. Или

$$\rho_\tau(t) = \left[\frac{I_0 r_0^2 (r_2^2 - r_1^2)}{1800 \left(\frac{t}{\mu} \right)^{5/2} \epsilon(t)} \right]^{2/3}. \quad (30)$$

На рис. 2 представлены кривые ρ_τ , полученные с помощью (30).

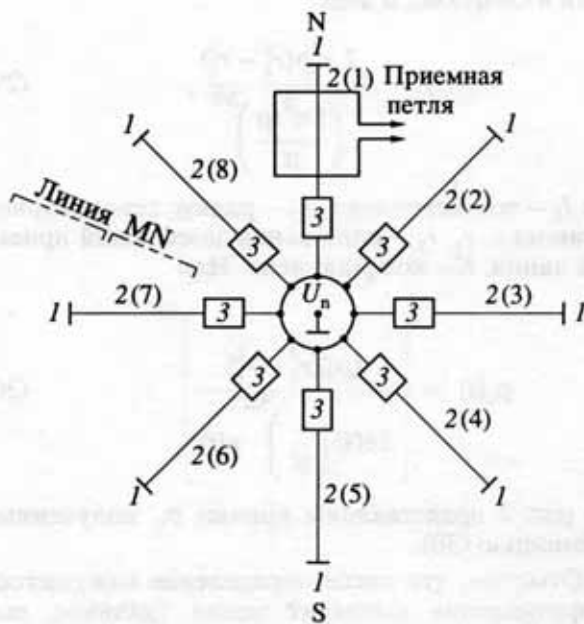
Отметим, что такое определение кажущегося сопротивления выглядит менее удачным, чем в ЗСБ. Это происходит от того, что характер поведения (спада) поля КЭД резко различается на разных стадиях процесса, а в средах с изолирующим основанием поле в поздней стадии затухает экспоненциально в отличие от (29). В результате кривые ρ_τ имеют большой диапазон изменения и плохо визуализируют информацию о промежуточной части разреза. Для трансформаций наблюдаемого сигнала в эффективные кривые кажущихся величин, видимо, нужно использовать более сложные базовые модели, нежели поздняя стадия становления в полупространстве. Для сред с непроводящим основанием явный интерес представляет в качестве базовой модели двухслойный разрез ($\rho_2 = \infty$).

МАГНИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Наиболее сложная и интересная проблема интерпретации ЗВТ возникает в связи с возможностью измерений магнитных составляющих на дневной поверхности. Мы уже неоднократно подчеркивали, что нормальное (для любой горизонтально-слоистой среды) магнитное поле на дневной поверхности отсутствует. Это следует как из общих физических соображений, так и утверждается математическим моделированием, проведенным выше. Но, понятно, магнитное поле возникнет при любом нарушении горизонтальной однородности разреза (кроме маловероятного соосного с источником осесимметричного нарушения).

Таким образом, в методе ЗВТ измерения электрической составляющей позволяют судить о горизонтально-слоистой структуре среды, а измерения магнитных компонент обнаруживают нарушения этой структуры уже одним фактом фиксации сигнала.

Схема эксперимента



1 – внешний электрод;
 2 – проводная линия (луч);
 3 – блок управления током луча;
 U_n – напряжение питания генератора тока ГТЭ-45

Рис. 3.

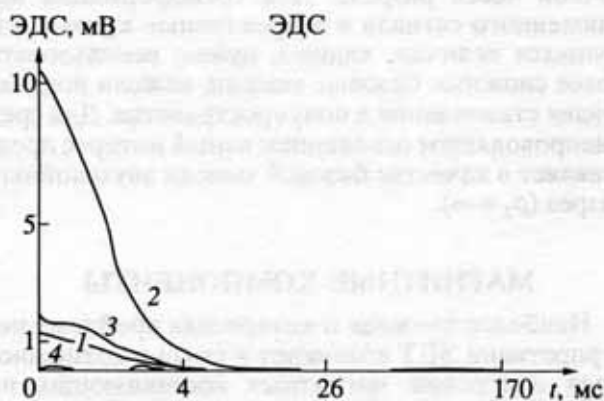


Рис. 4. Сигнал, измеренный с помощью петли.

Однако интерпретация отклика, полученного при измерении магнитной составляющей, является сложной задачей, поскольку одномерная интерпретация здесь совершенно невозможна. Разумеется, всегда можно строить карту распределения магнитной компоненты, как-то привязывая ее к глубинному строению разреза. Но полноценную методику интерпретации магнитной составляющей можно создать только с помощью трехмерного математического моделирования, достаточно оперативного. Разработка такого аппарата должна быть следующим этапом развития метода зондирования вертикальными токами.

ПОЛЕВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В полевом эксперименте предполагалось решить следующие задачи:

1. Показать техническую возможность реализации кругового электрического диполя, т.е. обеспечить равномерный ввод тока в землю при различных сопротивлениях заземлений радиальных лучей.

2. Показать, что при этом магнитная составляющая на поверхности земли стремится к нулю.

3. Уточнить необходимое число лучей установки КЭД.

Для проведения полевого эксперимента был разработан упрощенный макет электроразведочной системы зондирования вертикальными токами (ЗВТ) на основе аппаратуры "Цикл-4". Новым элементом в этом комплексе является система выравнивания токов в лучах установки (рис. 3).

Работы проводились с восьмилучевой установкой. Длина луча 500 м. Заземление каждого конца линии производилось железными кольями длиной 1 м, по три штуки, на расстоянии 2 - 3 м между собой. Таким образом, центральное заземление образовалось 24 забитыми кольями, соединенными между собой.

Линия MN располагалась радиально и симметрично относительно 7-го и 8-го лучей установки. Длина кондуктора от центра установки до первого электрода линии составляла 200 м. Стандартные неполяризуемые электроды укладывались в землю ниже границы промерзания (0.5 м).

Приемная петля 100 × 100 м располагалась, согласно рис. 3, на расстоянии (центр петли) 250 м от центра всей установки.

Полевое опробование метода зондирования вертикальными токами (ЗВТ) проводилось в зимних условиях в восточной части Западно-Сибирской плиты, в Каргатском районе Новосибирской области. В районе работ развита мощная толща осадочных образований, характерная для всей Западно-Сибирской платформы. Обобщенно, с позиции электрических свойств, состава и возраста, осадочные образования можно разделить на три комплекса: палеозойский – высокоомный, мезозойский – низкоомный и кайнозойский – повышенного сопротивления.

Установлено, что система позволяет подавать любой ток в пределах от 0 до 5 А в каждый из лучей и обеспечивать стабильность заданного распределения токов. В частности, несмотря на большой разброс сопротивлений заземлений концов линий, была осуществлена подача равных токов в линии, что и означает первую реализацию кругового электрического диполя (КЭД) как нового источника. Длительности питающих импульсов составляли 400, 800 и 1300 мс. Регистрация сигналов с петли и приемной линии производилась с накоплением.

номер слоя	Параметры модели	
	удельное сопротивление (Ом м)	мощность слоя (м)
1	4	35
2	25	210
3	4	110
4	40	400
5	5	1400
6	∞	∞

Рад. ген. – 500 м
MN – 200 - 700 м
Ток – 30 А

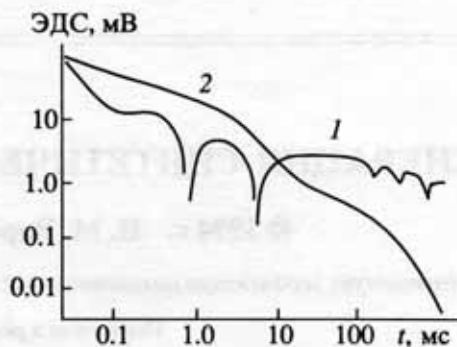


Рис. 5. 1 – сигнал, измеренный с помощью приемной линии; $r_0 = 500$ м, $r_1 = 200$ м, $r_2 = 700$ м, $I_0 = 30$ А; 2 – становление, рассчитанное для разреза по данным ЗСБ.

На рис. 4 представлены некоторые сигналы с петли. Кривая 1 – сигнал с петли при равных токах в восьми лучах, кривая 2 – ток отсутствует во второй линии, кривая 3 – равные токи в четырех лучах (4-лучевая установка), причем сигнал удвоен, чтобы он соответствовал общему току в 8-лучевой установке. Наконец, кривая 4, которая при выбранном масштабе едва заметна, представляет шум в петле. Можно сказать, что при равных токах происходит компенсация магнитного поля на поверхности земли, причем это происходит и при применении 4-лучевой установки.

На втором этапе проводились измерения сигнала с приемной линии. Мы получили отклик, который радикально отличается от сигнала становления, имеет два перехода через 0. На рис. 5 приведено это сравнение, причем становление рассчитано для разреза, уточненного по ЗСБ. Зарегистрированный нами сигнал в конце рассчитанного процесса становления в 500 раз его превышает. Нами проводились зондирования с разными длительностями питающего импульса и при различных наборах питающих лучей (1–2–3–4–5–6–7–8, 1–3–5–7, 2–4–6–8) что слабо влияло на характер отклика.

Итак, по всей видимости, мы зафиксировали сложный процесс, в котором самую значительную и, за краткостью процесса становления, основную во второй половине процесса роль играет процесс ВП. Конечно, в последующих экспериментах нужно будет убедиться, что сигнал определяется именно откликом среды, а не паразитными процессами в установке и аппаратуре.

Таким образом, построенный выше одномерный математический аппарат, основанный на чисто электродинамическом подходе, оказывается недостаточным для объяснения результатов эксперимента, хотя, разумеется, является совершенно необходимым этапом в развитии интерпретационного математического обеспечения ЗВТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, предлагаемый авторами новый электро-разведочный метод – зондирование вертикальными токами (ЗВТ) – обладает базовым математическим аппаратом, представленным выше. Проведен полевой эксперимент. Упрощенный макет электроразведочной системы ЗВТ на основе использования аппаратуры “Цикл-4” доказал свою работоспособность в сложных зимних условиях. Впервые реализован новый источник для электроразведки – КЭД. Установлена возможность компенсации нормального магнитного поля отдельных линий и тем самым показана возможность прямой регистрации аномального магнитного поля от геоэлектрических неоднородностей.

Показана управляемость установки ЗВТ вплоть до оперативного превращения ее в установку ЗСБ. Экспериментально исследован вопрос о необходимом количестве радиальных линий при реализации установки. Вполне приемлемо уменьшить число линий до 6.

Наконец, зарегистрирована электрическая радиальная составляющая поля, определяемая сложным сочетанием индуктивного процесса и процесса ВП.

Накоплен технологический опыт, позволяющий провести более объемные полевые работы.

Авторы выражают благодарность за полезные обсуждения при подготовке эксперимента и по его результатам В.С. Моисееву и В.В. Кормильцеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1062631 СССР. Способ геоэлектроразведки / Могилатов В.С. 1982.
2. Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 127 с.
3. Могилатов В.С. Круговой электрический диполь – новый источник для электроразведки // Физика Земли. 1992. № 6. С.
4. Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной среде. 11 // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1950. Т. 14. № 4. С. 281 - 293.