

УДК 550.837

© 1992 г. В.С. МОГИЛАТОВ

### КРУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ – НОВЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В статье вводится в теорию электроразведки новый источник электромагнитного поля – круговой электрический диполь (КЭД). Устанавливаются вид потенциалов и условия для них. Приводятся решения для устанавливающегося поля в некоторых частных случаях горизонтально-слоистой среды. Обсуждаются основные свойства переходного процесса, возбуждаемого КЭД, и структура его поля.

Эффективность электроразведочного метода складывается из многих компонент. Наверное, решающим обстоятельством является выбор источника электромагнитного поля. Правильный выбор источника позволяет создать оптимальную пространственно-временную структуру электромагнитного поля, максимально взаимодействующую с исследуемым объектом, чем и определяются реальные физические предпосылки решения поставленной задачи.

Рассмотрим с этой точки зрения проблему поиска углеводородов. Использование традиционного источника – незаземленной петли – в этом случае выглядит весьма необоснованным. В средах, характеризуемых в основном горизонтальной однородностью, что типично для нефтяных провинций, такой источник создает систему только горизонтальных токов, не реагирующих на протяженные тонкие плохо проводящие включения типа "залезь". Рассчитывать можно только на сопутствующие благоприятные обстоятельства (ореол повышенного сопротивления, водно-солевое окаймление), которые могут быть незначительны. Следует отметить, что процесс установления поля, возбужденного петлей, происходит таким образом, что зондирование идет скорее вширь, чем в глубину, и в процесс вовлекаются приповерхностные удаленные неоднородности. Заметим также, что энергия первичного магнитного поля петли, располагаемой на поверхности Земли, в значительной мере рассеивается в воздушном пространстве и источник неэкономичен в полевых условиях.

Классической альтернативой петлевому варианту является электрический источник – горизонтальная питающая линия. По сравнению с петлей она имеет некоторые преимущества (первичное поле – электрическое, имеется вертикальная компонента тока), отрицательные моменты (осевая асимметрия поля, сильная зависимость поля от наличия экрана) и те же недостатки (преимущественно латеральное распространение поля, бесполезное рассеивание первичного электромагнитного поля). Таким образом, линия – недостаточно радикальная альтернатива петле.

Мы предлагаем принципиально новый электрический источник, который создает в земле систему токов, замыкающихся в вертикальных плоскостях, т.е. его электромагнитное поле ортогонально полю петли (в горизонтально-слоистой среде).

Источник устраивается следующим образом. Один из полюсов генератора заземляется центральной точкой, а второй полюс заземляется равномерно по окружности с радиусом, определяемым в соответствии с требуемой глубиной исследования (рис. 1). Такой источник условно можно назвать "круговой электрический диполь" (КЭД). (Собственно, на рис. 1 представлен уже источник конечных размеров. Название КЭД более соответствует источнику, который используется ниже как идеализированный физичес-

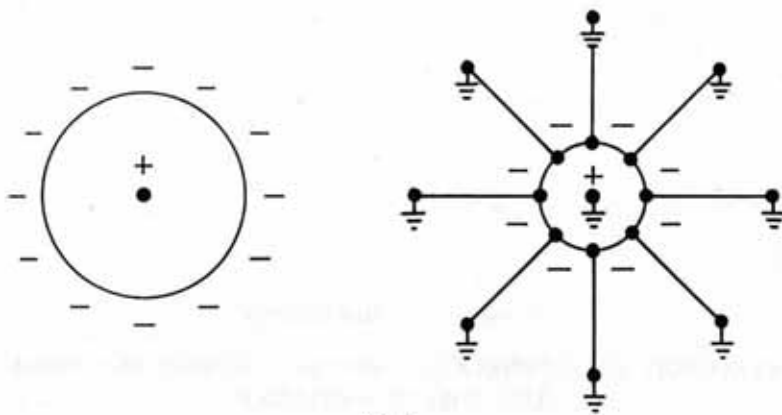


Рис. 1

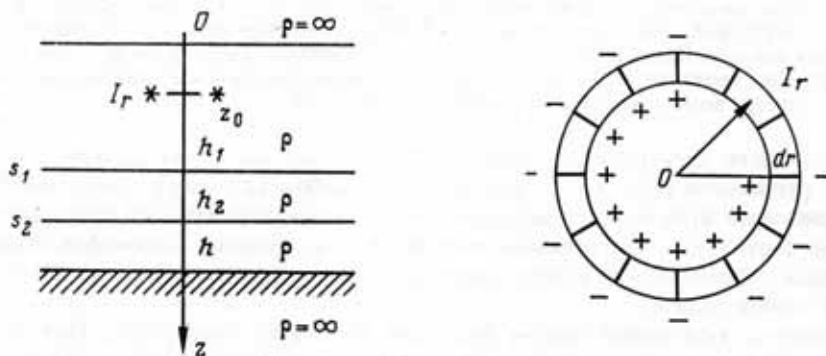


Рис. 2

кий объект при построении теории и изображен на рис. 2). На рис. 1 приведена также схема практической реализации такого источника. Отметим ряд уникальных особенностей поля КЭД, которые имеют строгое физико-математическое обоснование. В горизонтально-слоистой среде поле осесимметрично и имеет три компоненты:  $E_r$ ,  $H_\varphi$  и  $E_z$ , т.е., как уже говорилось, поле ортогонально к полю петли. На дневной поверхности имеется только радиальная компонента электрического поля, а магнитное поле возникает только в случае нарушения осевой (относительно центрального электрода) симметрии среды. В средах, подстилаемых изолирующим полупространством (фундаментом), спад поля в поздней стадии определяется экспоненциальным фактором, показатель которого зависит от всех параметров среды, что дает высокую разрешающую способность этого способа возбуждения.

Чрезвычайно важной особенностью процесса установления поля КЭД является его зависимость на всех стадиях процесса от вертикальной структуры среды в отличие от становления поля петли (а также и поля горизонтального электрического диполя), которое определяется на поздней стадии лишь суммарной продольной проводимостью разреза. Весьма показательным сравнением процессов от этих источников в присутствии такой классической модели, как проводящая пленка: КЭД не возбуждает процесса установления в этой среде, лишенной вертикального размера.

КЭД можно назвать с большим основанием, чем какую-либо другую питающую установку, фокусирующим источником. В самом деле, максимальная плотность вертикального тока, создаваемого центральным электродом, всегда, в течение всего процесса становления, остается под ним же, лишь погружаясь в среду. Напомним, что область максимальной плотности тока, возбуждаемого петлей ("токовое кольцо"), с погружением увеличивает свои размеры — максимум плотности удаляется по латерали от места

зарождения. Первичное поле КЭД — электрическое и магнитное — все целиком сосредоточено в среде и там же реализуется полностью. В процессе становления поля, возбужденного этим источником, среда ничего не излучает в верхнее и нижние изолирующие полупространства. Это легко принять, если учесть, что линии плотности тока образуют тороидальную систему, замыкающую в себе силовые линии магнитного поля.

Отметим также, что КЭД как электрический источник возбуждает кроме процесса становления и другие процессы с полезными квалификационными свойствами. Непременное наличие сильной вертикальной составляющей плотности тока может создавать на горизонтальных границах раздела сред значительные и, может быть, неизвестные до сих пор эффекты.

**Расчет поля КЭД.** Мы будем решать задачу об устанавливаемом поле КЭД, но сначала необходимо установить вид скалярного потенциала для этого источника в режиме постоянного тока (до выключения) как начального условия для нестационарной задачи. Пусть в неограниченной однородной среде с удельным сопротивлением  $\rho$  находится точечный источник  $\partial I$  в точке  $(z = z_0, r = r_0, \varphi = \varphi_0)$ . Тогда потенциал в любой точке

$$\partial U = \frac{\mu}{4\pi} \frac{\partial I}{\sqrt{(z_0 - z)^2 + R^2}}, \quad (1)$$

где  $R = \sqrt{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\varphi_0 - \varphi)}$ , или, учитывая известные математические соотношения:

$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^\infty J_0(mr) \exp(-m|z|) dm,$$

$$J_0(nR) = J_0(mr_0)J_0(mr) + 2 \sum_{k=1}^\infty J_k(mr_0)J_k(mr) \cos[k(\varphi_0 - \varphi)],$$

получим в виде  $(J_k(x) - \text{функция Бесселя } k\text{-го порядка})$

$$\begin{aligned} \partial U = & \frac{\partial I \rho}{4\pi} \left\{ \int_0^\infty J_0(mr_0)J_0(mr) \exp(-m \cdot |z_0 - z|) dm + \right. \\ & \left. + 2 \sum_{k=1}^\infty \cos[k(\varphi_0 - \varphi)] \int_0^\infty J_k(mr_0)J_k(mr) \exp(-m \cdot |z_0 - z|) dm \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Проинтегрировав теперь по  $\varphi_0$  от  $\varphi$  до  $\varphi + 2\pi$ , мы получим потенциал для источника, равномерно заземленного по окружности радиуса  $r_0$ , причем  $\partial I = I \partial \varphi_0 / (2\pi)$ , где  $I$  — полный ток. Далее, продифференцировав по  $r_0$ , мы получим выражение для потенциала кругового электрического диполя, помещенного в однородное проводящее пространство:

$$U = - \frac{I r \rho}{4\pi} \int_0^\infty J_1(mr_0)J_0(mr) m \exp(-m \cdot |z_0 - z|) dm, \quad (3)$$

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

Решим теперь задачу об устанавливаемом поле такого источника. Рассмотрим среду, состоящую из однородного слоя  $(\rho, h)$ , в котором содержатся проводящие плоскости  $S_1$  и  $S_2$  на глубинах  $h_1$  и  $h_2$ . В основании — изолятор. Источник — КЭД с моментом  $I_r$  — помещен на глубину  $z_0$  (рис. 2). В момент времени  $t = 0$  источник выключается. Вектор-потенциал вводим обычным для электрического источника образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \text{rot } \mathbf{A}, \\ U &= \rho \text{ div } \mathbf{A}. \end{aligned} \quad (4)$$

В силу симметрии задачи достаточно иметь отличной от нуля только компоненту

$A_z$ , тогда в цилиндрической системе координат имеются

$$E_r = \rho \frac{\partial^2 A_z}{\partial r \partial z}, \quad H_\varphi = -\frac{\partial A_z}{\partial r}, \quad E_z = -\mu \dot{A} + \rho \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}. \quad (5)$$

Компонента  $A_z$  должна удовлетворять достаточным условиям, обоснование которых можно найти, например, в [1]:

$$\Delta A_z = \frac{\mu}{\rho} A_z, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2), \quad 0 \leq r \leq \infty;$$

$\rho \frac{\partial A_z}{\partial z}$  непрерывно всюду, что означает  $A_z(0) = A_z(h) = 0$ ; на  $S$ -границах имеем условия

$$\left[ \frac{\partial A_z}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_i} = 0, \quad [A_z] \Big|_{z=h_i} = -\rho S_i \frac{\partial A_z}{\partial z}, \quad i = 1, 2;$$

далее

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

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

начальное условие – решение стационарной задачи.

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

$$A_z = \frac{I_r}{4\pi} \int_0^\infty J_0(mr) Z(m, z) dm, \quad (6)$$

Функция  $Z$  должна удовлетворять краевой задаче:

$$Z''_z - m^2 Z = \frac{\mu}{\rho} Z, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2);$$

$$Z(0) = Z(h) = 0; \quad (7)$$

$$\left[ \frac{\partial Z}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_i} = 0, \quad [Z] \Big|_{z=h_i} = -\rho S_i \frac{\partial Z}{\partial z}, \quad i = 1, 2;$$

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

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

где  $Z_0$  – стационарное решение, т.е. до выключения.

Для функции  $Z_0$  мы должны определить условие в источнике. Учитывая (3) и (4), найдем, что

$$\rho \frac{\partial A_z}{\partial z} \Big|_{\substack{r \rightarrow r_0 \\ z \rightarrow z_0}} \rightarrow -\frac{I_r \rho}{4\pi} \int_0^\infty J_1(mr_0) J_0(mr) m \exp(-m \cdot |z_0 - z|) dm,$$

это означает, что при  $z \rightarrow z_0$

$$\frac{\partial Z_0}{\partial z} \rightarrow -J_1(mr_0) m \exp(-m \cdot |z_0 - z|),$$

а это выражается условием

$$Z''_0(z_0^+) - Z''_0(z_0^-) = 2m^2 J_1(mr_0).$$

В таком случае краевая задача для  $Z_0$  такова:

$$\begin{aligned} Z''_{0z} - m^2 Z_0 &= 0, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2, z_0); \\ Z_0(0) &= Z_0(h) = 0; \\ \left[ \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right] \Big|_{z=Z_0} &= 0, \quad [Z_0] \Big|_{z=z_0} = 2J_1(mr_0); \\ \left[ \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_i} &= 0, \quad [Z_0] \Big|_{h=h_i} = -\rho S_i \frac{\partial Z_0}{\partial z}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (8)$$

Мы не будем решать эту задачу, но воспользуемся ее условиями. Решение задачи (7) ищем в виде

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} C_n X_n(z) e^{-(k_n^2 + m^2) \frac{z \rho}{\mu}}. \quad (9)$$

Функции  $X_n$  должны удовлетворять условиям (индекс  $n$  опускаем)

$$\begin{aligned} X''_z + k^2 X &= 0, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2); \\ X(0) &= X(h) = 0; \\ \left[ \frac{\partial X}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_i} &= 0, \quad [X] \Big|_{z=h_i} = -\rho S_i \frac{\partial X}{\partial z}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (10)$$

Получаем решение в виде

$$\begin{aligned} X_i(z) &= A_i \cos(kz) + B_i \sin(kz), \\ X'_i(z) &= -A_i k \sin(kz) + B_i k \cos(kz), \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (11)$$

Применяя граничные условия (10), найдем коэффициенты  $A_i, B_i$ :

$$\begin{aligned} A_1 &= 0, \\ B_1 &= 1 \quad (\text{полагаем в силу однородности}), \\ A_2 &= S_1 \rho k c_1^2, \\ B_2 &= 1 + S_1 \rho c_1 s_1, \\ A_3 &= S_1 \rho k c_1^2 + S_2 \rho k c_2^2 + S_1 S_2 \rho^2 k^2 c_1 c_2 (s_1 c_2 - c_1 s_2), \\ B_3 &= 1 + S_1 \rho k s_1 c_1 + S_2 \rho k s_2 c_2 + S_1 S_2 \rho^2 k^2 c_1 s_2 (s_1 c_2 - c_1 s_2), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $s_i = \sin(kh_i), c_i = \cos(kh_i), i = 1, 2$ , и получим уравнение для  $k$ :

$$A_3 \cos(kh) + B_3 \sin(kh) = 0. \quad (13)$$

Заметим, что решение задачи (10) не зависит от  $m$ .

В (9) остается определить коэффициенты  $C_n$ , которые должны обеспечить выполнение начального условия:

$$Z_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n X_n(z). \quad (14)$$

Нетрудно убедиться, что функции  $X_n$  образуют ортогональную систему в области  $0 \leq z \leq h$ , так что

$$C_n = \frac{\int_0^h Z_0(z) X_n(z) dz}{\int_0^h X_n^2(z) dz} \quad (15)$$

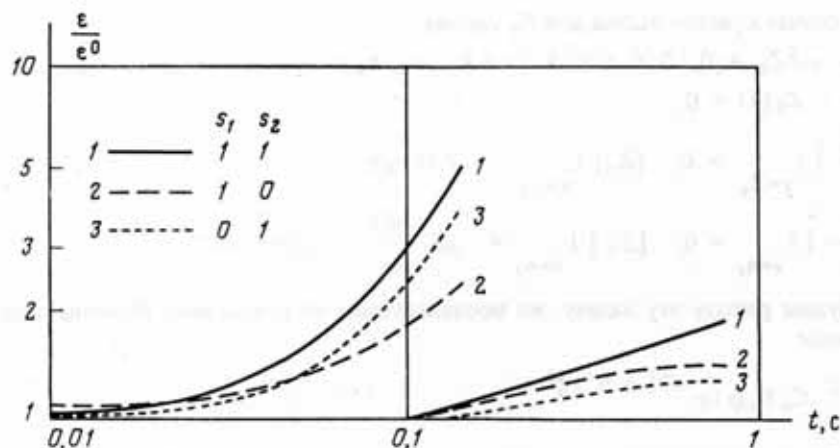


Рис. 3

Беря верхний и нижний интегралы по частям и учитывая условия задач для функций  $Z_0$  (8) и  $X_n$  (10), получим

$$C_n = \frac{J_1(mr_0)}{m^2 + k_n^2} D_n X_n'(z_0) \quad (16)$$

где  $D_n$  и  $X_n'(z_0)$  не зависят от  $m$ ,

$$D_n = \frac{4}{\frac{h}{k_n^2} \left( \frac{\partial X_n(h)}{\partial z} \right)^2 + \sum_{i=1}^2 \left\{ h_i [X_n^2] |_{h_i} + \frac{S_i \rho}{k_n^2} \left( \frac{\partial X_n(h_i)}{\partial z} \right)^2 \right\}}$$

Теперь можно представить решение для потенциала (6) в виде, удобном для расчетов:

$$A_z(r, z, t) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} D_n X_n(z) X_n(z_0) G_n(r, t), \quad (17)$$

где  $z_0$  – положение источника,  $r, z$  – координаты точки наблюдения, а

$$G_n = \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr) R(m)}{m^2 + k_n^2} e^{-(k_n^2 + m^2) \frac{t\rho}{\mu}} dm, \quad (18)$$

где  $R(m) = I_r J_1(mr_0)$  – для дипольного источника,  $R(m) = -\frac{I}{m} [1 - J_0(mr_0)]$  – для источника, заземленного при  $r_1 = 0, r_2 = r_0$ .

При  $t \rightarrow \infty$  интеграл (18) определяется при  $m \rightarrow 0$  и можно предложить для поздней стадии выражение для радиального градиента электрического поля на дневной поверхности:

$$E_r = \frac{I r_0^2 r}{16\pi h \alpha^2} \exp \left[ -k_1^2 a - \frac{r^2 + 4r_0^2}{4\alpha} \right], \quad (19)$$

где  $\alpha = t\rho/\mu$ , произведение  $I r_0^2$  – силовая характеристика этой питающей установки. Для двухслойной среды ( $S_1 = 0, S_2 = 0$ )  $k_n = \pi n/h$ . Поскольку в уравнение для  $k_1$  входят все параметры среды, из (19) следует, что, как бы ни были малы различия двух геоэлектрических разрезов (принадлежащих к рассмотренному нами классу (рис. 2)), наступит стадия процесса становления, когда поля будут различаться сколь угодно много. Нам нужно только убедиться, что такая уникальная разрешающая способность проявляется в измеряемом диапазоне сигнала-отклика.

На рис. 3 приведены расчеты, выполненные для разреза, определяемого набором параметров:  $\rho = 20$  Ом · м,  $h = 2000$  м,  $S_1 = 20$  См,  $h_1 = 1500$  м,  $S_2 = 20$  См,  $h_2 = 2000$  м.

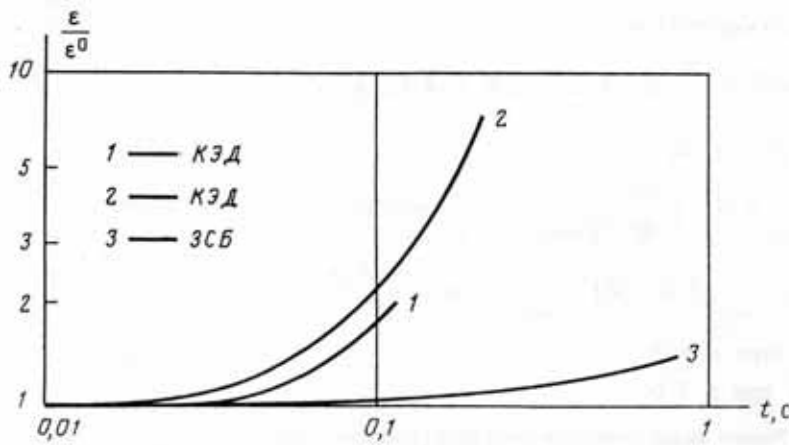


Рис. 4

Использовалась установка:  $r_0 = 500$  м,  $r_1 = 200$  м,  $r_2 = 700$  м,  $I = 50$  А. Полагалось также поочередно  $S_1 = 0$  и  $S_2 = 0$ . Кривые нормировались на нормальное поле ( $S_1 = S_2 = 0$ ). Здесь же для сравнения приведены аналогичные кривые, рассчитанные для обычной соосной установки ЗСБ-МПП: генераторная петля —  $800 \times 800$  м, измерительная —  $400 \times 400$  м, ток — 50 А. Все кривые ограничены по времени сигналом в 1 мкВ. Основные особенности поля КЭД очевидны — быстрый спад и резкая реакция на изменения в разрезе как следствия экспоненциального характера затухания.

**Поле КЭД в присутствии экрана.** Трудным вопросом для электрического источника, например для горизонтальной питающей линии, является экранирующий эффект плохо проводящих горизонтов в верхней и средней части разреза. Для горизонтальной линии это фатальное ограничение, поскольку токи находят легкую возможность замыкаться в горизонтальных плоскостях над экраном. В режиме становления поле проникает в какой-то мере в подэкранную толщу индукционным путем. Для поля КЭД, магнитное поле которого всегда сосредоточено только в горизонтах, охваченных токами, индукционное проникновение под экран невозможно. Однако можно ожидать, что специфическая конфигурация электрического поля (силовые линии в вертикальных плоскостях) заставляет токи проникать через экран, если поперечное сопротивление экрана не совсем уж велико.

Построим математический аппарат, который позволил бы количественно проанализировать эту ситуацию. Используем ту же модель и систему координат (рис. 2), только заменим верхнюю проводящую плоскость экраном с поперечным сопротивлением  $T$ . Теперь стационарное решение определяется при условиях

$$Z''_{0z} - m^2 Z_0 = 0, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2, z_0);$$

$$Z_0(0) = Z_0(h) = 0;$$

$$\left[ \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right] \Big|_{z=z_0} = 0, \quad [Z_0] \Big|_{z=z_0} = 2J_1(mr_0); \quad (20)$$

$$[Z_0] \Big|_{z=h_1} = 0, \quad \left[ \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_1} = -\frac{T}{\rho} m^2 Z_0(h_1),$$

$$\left[ \frac{\partial Z_0}{\partial z} \right] \Big|_{z=h_2} = 0, \quad [Z_0] \Big|_{z=h_2} = -\rho S \frac{\partial Z_0(h_2)}{\partial z},$$

а для нестационарного имеем:

$$\begin{aligned}
 Z''_z - m^2 Z &= \frac{\mu}{\rho} \dot{Z}, \quad 0 < z < h \quad (z \neq h_1, h_2); \\
 Z(0) &= Z(h) = 0; \\
 [Z]|_{z=h_1} &= 0, \quad \left[ \frac{\partial Z}{\partial z} \right]_{z=h_1} = -\frac{T}{\rho} m^2 Z(h_1), \\
 \left[ \frac{\partial Z}{\partial z} \right]_{z=h_2} &= 0, \quad [Z]|_{z=h_2} = -\rho S_i \frac{\partial Z(h_2)}{\partial z}, \\
 Z &\rightarrow 0 \quad \text{при } t \rightarrow \infty; \\
 Z &\rightarrow Z_0 \quad \text{при } t \rightarrow 0.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Решая эту задачу аналогично предыдущей, найдем, что

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} C_n X_n(z) e^{-(k_n^2 + m^2) \frac{t\rho}{\mu}}, \tag{22}$$

$$X_{ni}(z) = A_{ni} \cos(k_n z) + B_{ni} \sin(k_n z), \tag{23}$$

$$X_{ni}(z) = -A_{ni} k_n \sin(k_n z) + B_{ni} k_n \cos(k_n z), \quad i = 1, 2, 3,$$

$$\left. \begin{aligned}
 A_1 &= 0, \quad B_1 = 1, \\
 A_2 &= -\frac{Tm^2}{\rho k} s_1^2, \\
 B_2 &= 1 + \frac{Tm^2}{\rho k} s_1 c_1, \\
 A_3 &= A_2 (1 - s\rho k s_2 c_2) + B_2 S\rho k c_2^2, \\
 B_3 &= A_2 S\rho k s_2^2 + B_2 (1 + S\rho k s_2 c_2), \\
 s_i &= \sin(kh_i), \quad c_i = \cos(kh_i), \quad i = 1, 2,
 \end{aligned} \right\} n \tag{24}$$

$$C_n = \frac{4(m^2 + k_n^2)^{-1} J_1(mr_0) X'_n(z_0)}{\frac{h}{k_n^2} [X'_n(h_1)]^2 + \frac{h_1}{k_n^2} [X_n'^2]|_{n_1} + \frac{Tm^2}{k_n^2 \rho} [X_n(h_1)]^2 + h_2 [X_n^2]|_{n_2} + \frac{S\rho}{k_n^2} [X'_n(h_2)]^2} \tag{25}$$

для  $k_n$  имеем уравнение

$$A_{n3} \cos(k_n h) + B_{n3} \sin(k_n h) = 0, \tag{26}$$

а вектор-потенциал определяется интегралом

$$A_z = \frac{I_r}{4\pi} \int_0^{\infty} J_0(mr) Z(m, z) dm. \tag{27}$$

Заметим, что уравнение (26) зависит от переменной интегрирования  $m$  и в отличие от задачи с  $S$ -плоскостями теперь нужно решать уравнение (26) для каждого узла интегрирования (27). В поздней стадии процесса становления решение определяется первым членом ряда (22), причем интеграл (27) определяется при  $m \rightarrow 0$ . Из (21) следует, что в этом случае влияние  $T$ -плоскости падает. Таким образом, на разных стадиях процесса влияние плохо проводящего горизонта может быть значительным или ослабевать, и этим можно пользоваться в зависимости от того, является ли  $T$ -объект интересующей нас аномалией или мешающим фактором. Продемонстрируем это, используя расчеты по приведенному алгоритму.

На рис. 4 представлены нормированные кривые для разреза, где проводящий гори-



зонт (20 См) перекрыт экраном с поперечным сопротивлением  $T = 40\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$  (например,  $h = 20 \text{ м}$ ,  $\rho = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Вмещающая среда та же, что и в предыдущем примере:  $h = 2000 \text{ м}$ ,  $\rho = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , та же и призмно-питающая установка. В диапазоне сигнала до 1 мкВ отношение к нормальному полю ( $S = 0$ ) достигает величины 2 (кривая 1), тогда как соответствующая величина для петлевой установки — 1,4 (кривая 3, установка та же, что и на рис. 3). Остается также возможность увеличивать аномальный сигнал из подэкранной толщи увеличением размеров установки. Кривая 2 показывает, что при удвоении размеров установки аномальный сигнал в измеряемом диапазоне возрастает в 6 раз и составляет 600% нормального.

В заключение заметим, что проведенный предварительный анализ характеризует КЭД как весьма необычный инструмент, способный давать резкие аномальные эффекты, что требует осторожного обращения с ним. Очевидными проблемами, решение которых определит меру применимости этого источника, являются требования к геометрии установки при практической реализации и влияние латеральных изменений в разрезе. Кажется, что физическое моделирование или натурный эксперимент тут более простое и быстрое средство, чем математическое моделирование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейман С.М. Об установлении электромагнитных полей в земле // Прикладная геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1947. Вып. 9. С. 3–55.

Новосибирск

Поступила в редакцию  
5.12.91