

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ТОКАМИ

В. С. Могилатов

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
630104, Новосибирск, Красный пр., 67, Россия

Обсуждаются некоторые преимущества и проблемы предлагаемого способа георазведки — зондирования вертикальными токами (ЗВТ), основанного на применении нового источника — кругового электрического диполя (КЭД).

Электроразведка, становление поля, круговой электрический диполь, зондирование вертикальными токами.

ВВЕДЕНИЕ

Суть предлагаемого способа электроразведки состоит в использовании качественно нового контролируемого источника — кругового электрического диполя (КЭД). Допустим, мы имеем в своем распоряжении неограниченное количество отрезков провода — линий АВ. Каждый из них является и индуктивным и гальваническим источником. Соединяя и заземляя отрезки различным образом, мы можем образовать бесконечное множество разных источников, в разной мере индуктивных и гальванических. Среди этого множества можно выделить два класса. Первый — это замкнутые незаземленные контуры, источники чисто индуктивные и давно используемые в электроразведке. Другой, явно выделяемый класс возникнет, если мы сможем избавиться теперь уже от индуктивной составляющей, присущей отдельной линии. Сделать это можно единственным способом — равномерно распределить линии с равными токами в радиальных направлениях. Так мы получаем круговой электрический диполь — источник чисто гальванический, лишенный собственного магнитного поля. Приведенное рассуждение иллюстрируется схемой на рис. 1.

Таким образом, любой замкнутый контур и КЭД можно описать, и в математическом плане тоже, как совокупность электрических диполей, особенно это касается КЭД как реальной установки с небольшим числом радиальных линий (6 или 8). Однако гораздо удобнее, и мы предпочитаем именно такой подход, ввести идеальные физические объекты — вертикальный магнитный диполь для описания поля замкнутого контура, круговой электрический диполь для чисто гальванического источника. КЭД можно также определить как осесимметричный электрический источник, имеющий момент M , в цилиндрической системе координат. Кстати сказать, в таком качестве он упоминался в работе [1], но лишь как формальное средство для разложения по угловым гармоникам поля обычного электрического диполя.

По результатам [2, 3] и предваряя анализ, проведенный в этой работе, перечислим наиболее интересные из свойств кругового электрического диполя. Они все, конечно, взаимосвязаны, а в совокупности характеризуют КЭД как совершенно необычный источник для электроразведки методом ЗС.

КЭД — источник, не имеющий собственного магнитного поля.

Следовательно, это чисто гальванический источник, в отличие от петли — чисто индуктивного, и от линии, которая и то, и другое.

Нормальное магнитное поле на дневной поверхности (и выше) любой горизонтально-

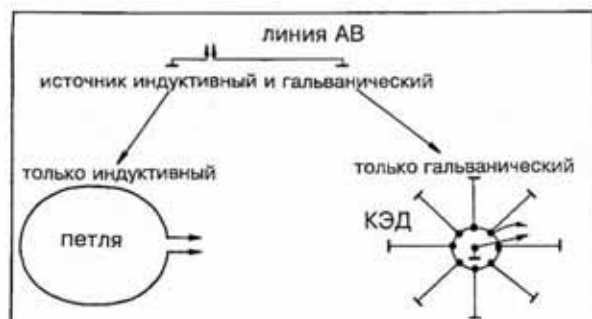


Рис. 1. Три типа источников в электроразведке.

слоистой среды отсутствует, а поле, определяемое ею, фиксируется только радиальной электрической компонентой. Поле, возбуждаемое КЭД, ортогонально полю петли и обладает круговой симметрией.

Поле КЭД всегда определяется вертикальной структурой среды, и на поздней стадии становления тоже, а не суммарной продольной проводимостью. Интересное следствие: в морской электро-разведке слой морской воды не будет играть такой фатальной роли при применении КЭД, как при использовании петли или линии. В средах с изолирующим основанием спад поля КЭД происходит экспоненциально. Вообще, процесс установления в 5—10 раз быстрее, чем от петли или линии.

Можно рассматривать КЭД и как наземный аналог другого известного источника — вертикальной электрической линии.

КЭД как источник чисто гальванический, не возбуждающий длинного процесса установления, определяемого первичным магнитным полем, весьма вероятно, окажется новым полезным средством при изучении процессов ВП. Причем заметим, что КЭД — *простой* источник, а линия — *сложный*, и это надо иметь в виду при изучении такого сложного явления, как ВП.

Учитывая выраженный вертикальный характер токов под центральным электродом и циркуляцию токов в вертикальных плоскостях, предлагаем способ электроразведки с использованием КЭД называть методом зондирования вертикальными токами (ЗВТ).

ПОЛЕ КЭД В ОДНОРОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

На постоянном токе КЭД можно рассмотреть в ряду других заземляемых источников с осесимметричным вводом тока в землю — точечного источника и кольцевого заземления. Собственно КЭД есть источник, образованный двумя разнополярными кольцевыми заземлениями, радиусы которых различаются на бесконечно малую dr_0 . Установку конечных размеров, которую мы также будем называть КЭД, можно получить интегрированием КЭД по радиусу или устраивая два кольцевых разнополярных заземления с различными радиусами. В практически важном частном случае установка КЭД есть комбинация разнополярных, соосных кольцевого и точечного источников.

В однородном полупространстве потенциал таких осесимметричных источников можно записать в виде

$$U = \frac{I \cdot \rho}{4\pi} \cdot \int_0^{\infty} J_0(mr) \cdot R(r_0) \cdot Z(z, z_0, m) \cdot dm, \quad (1)$$

$$\text{где } R(r_0) = \begin{cases} 1 & \text{— точечный источник,} \\ J_0(mr_0) & \text{— кольцевое заземление,} \\ 1 - J_0(mr_0) & \text{— конечная установка КЭД,} \\ -m \cdot J_1(mr_0) \cdot dr_0 & \text{— дипольная установка (собственно КЭД),} \end{cases}$$

а функция

$$Z(z, z_0, m) = \begin{cases} \exp[-m \cdot (z - z_0)], & z \geq z_0, \\ \exp[m \cdot (z - z_0)], & z < z_0. \end{cases}$$

Интеграл (1) не выражается в случае КЭД в элементарных функциях. Для конечной установки можно предложить потенциал в виде

$$U = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}} - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{K(k)}{\sqrt{(r + r_0)^2 + (z - z_0)^2}} \right), \quad (2)$$

где $K(k)$ — полный эллиптический интеграл, а

$$k = \frac{2 \cdot \sqrt{r \cdot r_0}}{\sqrt{(r + r_0)^2 + (z - z_0)^2}}.$$

Учитывая, что

$$E = -\text{grad}U,$$

и удовлетворяя уравнениям Максвелла в цилиндрических координатах всюду, кроме точек протекания стороннего тока,

$$-\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial z} = \frac{E_r}{\rho}, \quad \frac{H_{\varphi}}{r} + \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial r} = \frac{E_z}{\rho}, \quad \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

получим для компонент поля в однородном пространстве

$$E_r = -\frac{I\rho}{4\pi} \cdot \int_0^{\infty} J_1(mr) \cdot m \cdot R(r_0) \cdot \exp[\alpha \cdot m \cdot (z - z_0)] \cdot dm,$$

$$E_z = \frac{I\rho}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot R(r_0) \cdot \alpha \cdot m \cdot \exp[\alpha \cdot m \cdot (z - z_0)] \cdot dm, \quad (4)$$

$$H_\varphi = \frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_1(mr) \cdot R(r_0) \cdot \alpha \cdot m \cdot \exp[\alpha \cdot m \cdot (z - z_0)] \cdot dm,$$

где $\alpha = -1$, если $z \geq z_0$ и $\alpha = 1$, если $z < z_0$.

Выражение для магнитного поля учитывает только токи в среде и не учитывает магнитное поле сторонних токов. Однако в случае КЭД, если мы потребуем, чтобы сторонний ток имел только радиальную компоненту, не зависящую от φ , это выражение дает и полное магнитное поле.

Подобная конфигурация поля (наличие только E_r , E_z , H_φ) сохраняется для любой горизонтально-слоистой среды при любом режиме возбуждения. Нетрудно показать, что в горизонтах с бесконечным сопротивлением магнитного поля нет. Рассмотрим в таком слое контур-окружность s с центром, лежащим на оси источника. Уравнение Максвелла в интегральной форме в квазистационарном приближении

$$\oint H_t \cdot ds = \int j \cdot dS$$

превращается в равенство $H_\varphi \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 0$, где r — радиус окружности, а S — произвольная поверхность, опирающаяся на контур s . Отсюда следует, что магнитного поля в воздухе и на дневной поверхности нет, и что индуктивное проникновение поля КЭД под изолирующий экран невозможно. Поле КЭД в горизонтально-слоистых средах сосредоточено только в горизонтах, имеющих электрический контакт (непосредственный или через другие проводящие горизонты) с горизонтом, в котором заземлен источник.

ПОЛЕ КЭД В ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Подробный вывод выражений для устанавливающегося поля КЭД в горизонтально-слоистом полупространстве приведен в [3]. Здесь лишь приведем формулы для гармонического режима и временной области. Начало координат — на дневной поверхности, ось z направлена вниз, среда описывается значениями удельного сопротивления и мощности $(\rho_0, \rho_1, h_1, \dots, \rho_l, h_l, \dots, \rho_{N-1}, h_{N-1}, \rho_N)$.

Поместим источник на глубину z_0 в l -й слой. Тогда плотность стороннего тока отлична от 0 на окружности ($z = z_0, r = r_0$), если источник дипольный, или на круге ($z = z_0, 0 \leq r \leq r_0$), если источник конечных размеров. Причем сторонний ток имеет только радиальную компоненту и меняется по некоторому закону

$$I = I \cdot T(t). \quad (5)$$

Учитывая выражения для компонент поля в однородном пространстве (4), будем искать решение в виде

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_1(mr) \cdot m \cdot R(r_0) \cdot \rho(z) \cdot X(z, z_0, m, t) \cdot dm, \\ E_z &= \frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_0(mr) \cdot R(r_0) \cdot \rho(z) \cdot m \cdot Z(z, z_0, m, t) \cdot dm, \\ H_\varphi &= \frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_1(mr) \cdot R(r_0) \cdot F(z, z_0, m, t) \cdot dm. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда всюду, кроме точек протекания стороннего тока, имеем

$$F'_z = m \cdot X, \quad Z = F, \quad -X'_z + m \cdot Z = -\frac{\rho}{m} \cdot \frac{1}{m} \cdot \dot{F}. \quad (7)$$

Рассмотрим вначале гармонический режим, т. е. функцию $T(t)$ из (5) определим, как $T(t) = \exp(-i\omega t)$ и, соответственно, $F(t) = F(\omega) \cdot \exp(-i\omega t)$. Для практически важного случая, когда круговой электрический диполь и точка наблюдения находятся на дневной поверхности ($z = z_0 = 0, \rho_0 = \infty$):

$$\begin{aligned} F(0) &= 0, \quad F'_z(0) \cdot \rho_1 = -2/W_1, \\ W_j &= -\frac{1}{\rho_j \cdot n_j} \cdot \frac{W_{j+1} \cdot \rho_j \cdot n_j - \text{th}(n_j h_j)}{W_{j+1} \cdot \rho_j \cdot n_j \cdot \text{th}(n_j h_j) - 1}, \quad W_N = -\frac{1}{\rho_N \cdot n_N}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Формулы (6) и (7) позволяют получить все компоненты поля. На дневной поверхности отлична от 0 только E_z . Заметим, что при $\omega = 0$ ($n_j = m$) имеем решение для постоянного тока. Решение во временной области при произвольном возбуждении, в том числе и процесс установления при ступенчатом возбуждении, можно получить, пользуясь аппаратом преобразований Фурье.

Приведем также решение во временной области для устанавливающегося поля после ступенчатого выключения постоянного тока в источнике в момент времени $t = 0$. Метод, подробно рассмотренный в [4], применим в случае непроводящих верхнего и нижнего полупространств ($\rho_0 = \infty$, $\rho_N = \infty$).

$$F(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot X_n(z) \cdot e^{-\eta_n \cdot \frac{t}{\mu}}. \quad (9)$$

В j -м слое ($j = 1, 2, \dots, N-1$), введя функцию $Y_n = X_n' \cdot \rho_j$, имеем

$$X_n(z) = X_{nj} \cdot \cos[k_{nj} \cdot (H_j - z)] - Y_{nj} \cdot \sin[k_{nj} \cdot (H_j - z)] / (k_{nj} \cdot \rho_j), \quad (10)$$

$$Y_n(z) = X_{nj} \cdot k_{nj} \cdot \sin[k_{nj} \cdot (H_j - z)] \cdot \rho_j + Y_{nj} \cdot \cos[k_{nj} \cdot (H_j - z)],$$

где X_{nj} , Y_{nj} — значения функций $X_n(z)$, $Y_n(z)$ на j -й границе ($z = H_j$), причем $X_{n1} = 0$, $Y_{n1} = 1$, $k_{nj}^2 = \eta_n / \rho_j - m^2$.

Функции $\eta_n(m)$ являются решениями уравнения $X_n(H_N) \equiv X_{nN} = 0$. Заметим, что k_j может принимать мнимые значения, тогда вещественное тригонометрическое решение переходит в вещественное гиперболическое решение. Наконец,

$$C_n = \frac{4 \cdot Y_1}{\eta_n \cdot \sum_{j=1}^{N-1} \left\{ h_j \cdot \left[X_{nj}^2 + Y_{nj}^2 \cdot \frac{1}{k_{nj}^2 \cdot \rho_j^2} \right] - \frac{1}{k_{nj}^2 \cdot \rho_j} \cdot [X_{nj+1} \cdot Y_{nj+1} - X_{nj} \cdot Y_{nj}] \right\}}. \quad (11)$$

Определенные здесь коэффициенты C_n соответствуют положению источника на дневной поверхности. Напоминаем, что индекс n относится к суммированию ряда (9) для функции F , а индекс j — номер слоя среды ($h_j = H_{j+1} - H_j$, $j = 1, 2, \dots, N-1$).

Все описанные здесь алгоритмы реализованы в виде программ для постоянного тока, гармонического режима и режима установления (двумя способами).

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПОЛЯ КЭД

Итак, единственной компонентой на дневной поверхности, свидетельствующей о процессе установления токов в горизонтально-слоистой среде, является радиальная компонента электрического поля. Мы отдаем себе отчет в том, что полученный выше математический аппарат недостаточен в реальных условиях из-за неучета эффектов вызванной поляризации. Действительно, в первых полевых экспериментах кривые ЭДС в приемной линии MN качественно отличались от рассчитанных с помощью развитого выше математического аппарата. Однако анализ свойств нового источника в неполяризующихся средах является совершенно необходимым этапом и будет иметь практическое значение при интерпретации результатов, полученных уже в реальной поляризующейся среде.

Рассмотрим поле КЭД в двухслойной (ρ, h) среде. Воспользовавшись общими формулами (6) и (9—11), получим (при изолирующем основании) на дневной поверхности

$$E_r = -\frac{I\rho}{4\pi} \cdot \int_0^\infty J_1(mr) \cdot m \cdot R(r_0) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2 \cdot \exp[-(k_n^2 + m^2) \cdot \frac{t \cdot \rho}{\mu}]}{m \cdot h \cdot (k_n^2 + m^2)} \cdot dm, \quad (12)$$

где в этом случае имеем уравнение для k_n в виде

$$\frac{\sin(k_n \cdot h)}{k_n \cdot h} = 0,$$

т. е. $k_n = \pi n / h$, $n = 1, 2, \dots$

Понятно, что при больших значениях t достаточно взять только первый член ряда в (12) ($k_1 = \pi/h$), причем при $t \rightarrow \infty$ интеграл (12) определяется при малых значениях m , и мы получаем асимптотическую формулу для поздней стадии становления

$$E_r = -\frac{I\rho}{\pi h^2} \cdot \left(\frac{\pi^2 r_0^2}{4h^2}\right) \cdot \frac{r}{h} \cdot \left(\frac{\mu h^2}{2\pi t\rho}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 t\rho}{\mu h^2} - \frac{\mu r^2}{t\rho}\right). \quad (13)$$

Таким образом, мы демонстрируем два взаимосвязанных свойства поля КЭД в средах с изолирующим основанием — экспоненциальный спад поля в поздней стадии и зависимость от вертикального размера среды, в отличие от полей петли и линии, которые определяются на поздней стадии только суммарной продольной проводимостью.

В средах с проводящим основанием спад имеет степенную зависимость. Например, для полупространства можно предложить такое (воспользовавшись уже частотным решением и трансформацией Фурье) выражение для ЭДС в приемной линии (r_1, r_2) для поздней стадии

$$\varepsilon(t) = K \cdot \frac{I \cdot r_0^2 \cdot \rho \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{\left(\frac{8 \cdot \pi^2 \cdot t \cdot \rho}{\mu}\right)^{5/2}}, \quad (14)$$

и отсюда, следуя традиции, получим выражение для кажущегося сопротивления

$$\rho_r(t) = \left[\frac{I \cdot r_0^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{1800 \cdot \left(\frac{t}{\mu}\right)^{5/2} \cdot \varepsilon(t)} \right]^{2/3}. \quad (15)$$

Интересно, что если в (12) положить $r_0 = \infty$ (т. е. $R(r_0) = 1$), мы получим выражение для устанавливающегося поля точечного источника, которое мы имеем право рассмотреть, поскольку предлагаем такую токоподводящую систему проводников, которая не имеет собственного магнитного поля. В поздней стадии

$$E_r = -\frac{I\rho}{\pi h} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 t\rho}{\mu h^2}\right) \cdot \frac{1}{r} \cdot \left[\exp\left(-\frac{\mu r^2}{t\rho}\right) - 1\right]. \quad (16)$$

По-видимому, нет смысла проводить здесь анализ разрешающей способности радиальной компоненты поля КЭД в режиме установления, поскольку в реальных условиях сигнал в приемной линии будет обусловлен в основном процессами ВП. Приведем только один пример, имеющий в силу сказанного, условный характер.

Интересным следствием того свойства поля КЭД, что оно не определяется суммарной продольной проводимостью разреза, является возможность получения значительного аномального эффекта от глубинного объекта при расположении установки в море, несмотря на подавляющий вклад слоя морской воды в суммарную продольную проводимость. Сравним в поздней стадии аномальные эффекты ЗВТ (КЭД — $r_0 = 1000$ м, MN — $r_1 = 2000$ м, $r_2 = 3000$, ток — 100 А) и ЗСБ (соосная установка, генераторная петля — 1000×1000 м, приемная — 500×500 м, ток — 100 А) от проводящего глубинного горизонта (табл. 1). Время регистрации для обеих установок ограничено минимальными сигналами, примерно в 1 мкВ. Неудача ЗСБ (несмотря на то, что мы использовали весьма поздние, практически недостижимые времена), конечно, объясняется тем, что возбуждаемые горизонтальные токи концентрируются в воде и слабо проникают ниже. Значение этого примера, кроме проблемы ВП, ограничивается еще и проблемой влияния геоэлектрических неоднородностей.

Таблица 1. Сравнение ЗСБ и ЗВТ в морских условиях

№ п/п	Геоэлектрический разрез		Аномальные эффекты ЗСБ и ЗВТ в поздней стадии процесса установления			
	h , м	ρ , Ом·м	Метод	t , мс	E_n , мВ	E_a/E_n , % объект
1	100	0,05	ЗСБ	9930	0,00302	0,83
2	1850	10				
3	50	10/1				
4	∞	∞	ЗВТ	35,2	0,00256	28,7

Как правило, аномальный вклад локальных объектов или нарушений горизонтальной однородности разреза в электроразведочных методах ЗС фиксируется на мощном фоне отклика от вмещающей толщи. Это, с одной стороны, создает трудности при регистрации отклика, с другой стороны, затрудняет интерпретацию, заключающуюся на первом этапе в выделении аномальной части отклика. Проблема подавления нормального фона вмещающей среды может решаться, в частности, путем оптимизации источника поля. Можно рассматривать круговой электрический диполь, как такой оптимизированный источник, имея в виду отсутствие нормального магнитного поля.

Понятно, что проиллюстрировать эффект от нарушения горизонтальной однородности разреза при применении установки КЭД можно только с помощью трехмерного математического моделирования. Приведем результаты приближенных расчетов по методу возмущений. Мы рассматриваем вмещающую горизонтально-слоистую модель среды, а неоднородность заменяем объемным распределением устанавливающихся сторонних токов, определяемых только нормальным электрическим полем. Такой подход дает весьма оперативную вычислительную процедуру, пригодную для некоторых оценок и в полевых условиях. Мы имели возможность сравнить наши расчеты с более строгим численным анализом метода конечных элементов.

Отмечаем, что расчеты устанавливающегося поля проводились без учета ВП, что мы считаем достаточным для предлагаемого теоретического исследования. Кроме того, учет процессов ВП в этом случае выглядит менее актуальным из-за индуктивного приема, а также потому, что нормальное магнитное поле ВП будет отсутствовать по тем же причинам, что и магнитное поле индукции.

Итак, на рис. 2 представлена модель среды в разрезе и в плане. Понятно, что ставилась задача определения положения и размеров рудного тела по наблюдаемому на дневной поверхности полю. При фиксированном положении источника (КЭД) моделировались измерения по площади индукционным датчиком. На представленной здесь же карте изолиний наблюдаемой ЭДС неоднородность проявила себя достаточно определенно. В экстремумах, которые указывают положение торцов вытянутого тела, значения ЭДС достигают 18 мкВ. Кривые становления имеют максимум в районе 2 мс. На этом времени и дана карта изолиний. Мы привели здесь результаты измерений вертикальной компоненты производной магнитной индукции, но неоднородность четко фиксируется и в горизонтальных компонентах.

Заметим, что избавившись от нормального поля посредством применения оптимизированного источника, мы разом облегчили некоторые технические проблемы регистрации отклика. Магнитный отклик среды при использовании КЭД, целиком обязанный неоднородности, обладает небольшим динамическим диапазоном, требования к точности его регистрации невелики. Это позволяет сузить полосу пропускания измерительного комплекса (датчик—измеритель) и существенно повысить его чувствительность.

Однако искушенному читателю понятно, что, решив некоторые проблемы регистрации и интерпретации в предлагаемом здесь способе электроразведки, мы сделали это при некоторых

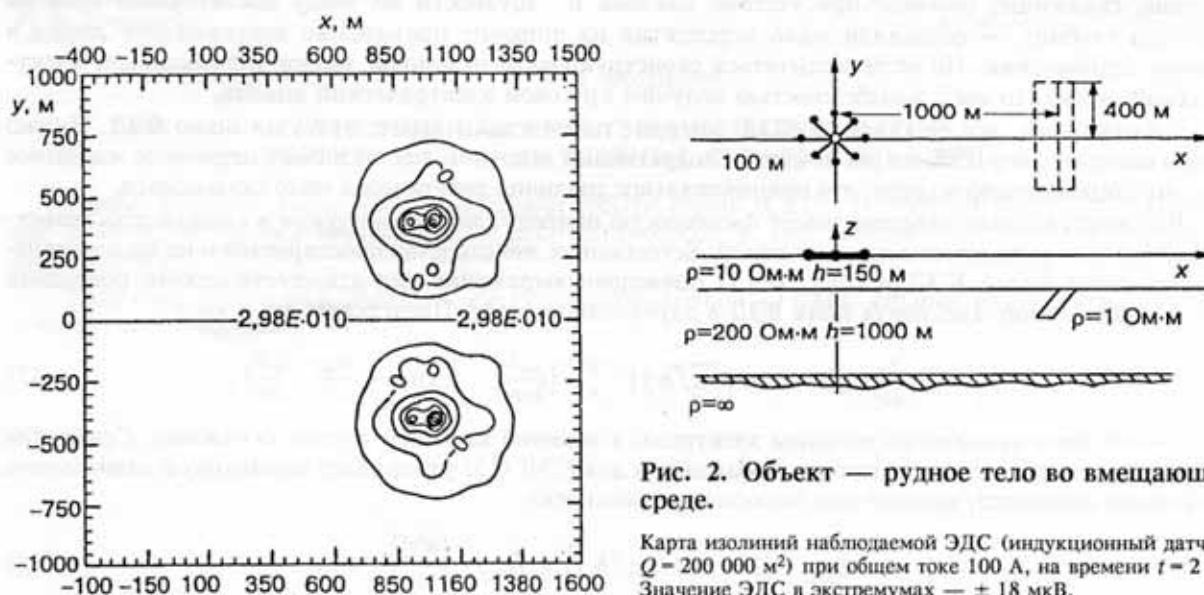


Рис. 2. Объект — рудное тело во вмещающей среде.

Карта изолиний наблюдаемой ЭДС (индукционный датчик, $Q = 200\,000\text{ м}^2$) при общем токе 100 А, на времени $t = 2\text{ мс}$. Значение ЭДС в экстремумах — $\pm 18\text{ мкВ}$.

Таблица 2. Остаточное нормальное поле на времени 2 мс для установки и разреза, изображенных на рис. 2 (мкВ)

Число лучей	Удаление от источника, м					
	200	300	500	750	1000	1500
6	0,86	4,7	10	2,4	0,26	0
8	0,0014	0,06	0,09	0,032	0,0028	0

условиях, выполнение которых также является проблемой. Конечно, это, прежде всего, возможность практической реализации кругового электрического диполя как установки, не имеющей собственного магнитного поля. До сих пор наши рассуждения (и математическое моделирование) базировались на представлении о КЭД как об источнике с идеально осесимметричным распределением вводимого в среду тока. Реально же мы заменяем этот идеал конечным набором радиально (через равные углы) расположенных линий одинаковой длины и с одинаковым током. Предварительные расчеты поля от такой системы проводников и первые полевые эксперименты с установкой КЭД показали, что требования к точности установки длин, углов и токов можно разумными усилиями удовлетворить. В полевых экспериментах токи при весьма различных сопротивлениях заземлений уравнивались специально разработанным (Балашов Б. П.) устройством.

Сложнее дело обстоит с количеством радиальных линий. Остаточное магнитное поле с увеличением числа линий уменьшается медленнее, чем хотелось бы. Здесь возможны два подхода. Первый состоит в том, чтобы, увеличивая количество линий, сделать остаточное „нормальное“ поле пренебрежимо малым по сравнению с полем неоднородностей. Другой подход предусматривает компромисс — учет остаточного поля установки при обработке результатов наблюдений.

В табл. 2 приведены значения остаточной ЭДС для той же установки, вмещающей среды и на том же времени, что использовались выше (см. рис. 2). Эти данные получены посредством специально изготовленной процедуры для расчета устанавливающегося поля в горизонтально-слоистой среде от произвольного набора электрических линий. Такая процедура должна стать неперенным элементом математического обеспечения ЗВТ. Значения ЭДС даны вдоль такого радиального профиля, где они максимальны (на четверти угла между лучами). Заметим, что имеется $2N$ (N — число лучей) радиальных профилей, где остаточное магнитное поле равно 0. Итак, из табл. 2 видно, что при наборе из шести линий остаточное поле нужно учитывать, имея в виду, что полезный сигнал не превышает 20 мкВ.

КРУГОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЛИНИЯ

Давно известен и изучался при различных режимах возбуждения вертикальный электрический диполь (ВЭД). Сошлемся здесь на собственный опыт [4, 5]. В режиме установления были выявлены некоторые замечательные особенности поля этого источника, совершенно невозможные для традиционных наземных источников — петли и линии. Однако изучение возможностей практического применения этого источника в режиме установления принесло разочарование. Наличие обсадной колонны скважины, обычное присутствие наклона и трудности по вводу достаточного тока на большую глубину — оставляли мало перспектив на широкое применение вертикальной линии в режиме становления. Но если попытаться сконструировать наземный аналог вертикальной электрической линии, то мы с неизбежностью получим круговой электрический диполь.

В самом деле, все те качества КЭД, которые перечислены выше, присущи полю ВЭД. Нужно только заметить, что ВЭД все же отчасти и индуктивный источник, но, поскольку первичное магнитное поле все сосредоточено в среде, это принципиальное различие практически мало сказывается.

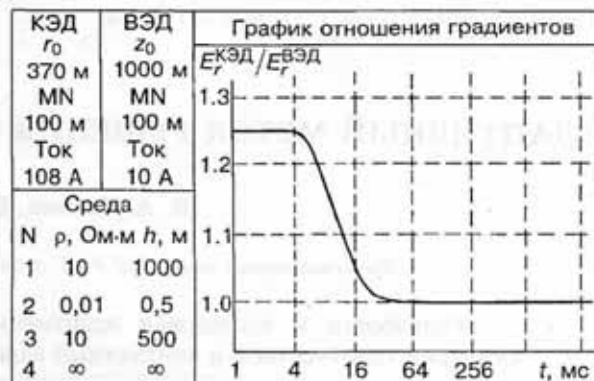
Разумеется, такое сходство имеет физическую природу, заключающуюся в схожей пространственной структуре электромагнитных полей. Естественно, это сходство простирается и на математическое описание полей КЭД и ВЭД. В [5] приведено выражение для асимптотического поведения ($t \rightarrow \infty$) радиального градиента поля ВЭД в двухслойной среде. Представим его в виде

$$E_r = -\frac{I\rho}{\pi h^2} \cdot [1 - \cos(\pi z_0/h)] \cdot \frac{r}{h} \cdot \left(\frac{\mu h^2}{2\pi I\rho}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 I\rho}{\mu h^2} - \frac{\mu r^2}{I\rho}\right), \quad (17)$$

где z_0 — глубина заземления нижнего электрода, а верхний заземлен в устье скважины. Сравнение этого выражения с соответствующим выражением для КЭД (13) утверждает одинаковую зависимость от времени и разности, причем при выполнении равенства

$$I_{\text{ВЭД}} \cdot [1 - \cos(\pi z_0/h)] = I_{\text{КЭД}} \cdot \left(\frac{\pi^2 r_0^2}{4h^2}\right), \quad (18)$$

Рис. 3. Сравнение полей КЭД и ВЭД.



где $I_{\text{ВЭД}}$ и $I_{\text{КЭД}}$ — токи в установках, поля совпадают количественно. На рис. 3 приведено сопоставление радиальных градиентов полей КЭД и вертикальной линии. Несмотря на то, что нижний электрод заземлен непосредственно в проводящий горизонт, отношение градиентов быстро выходит на значение, равное 1 (причем используется соотношение (18), полученное в двухслойной среде). Возможна, конечно, такая разница в начальных условиях (например, заземление под изолирующий экран), что процессы будут качественно различны во всем измеряемом диапазоне.

ВЫВОДЫ

Мы показали принципиальные возможности, которые дает новый источник, это и было целью предложенной читателю работы. При удовлетворительном решении затронутых уже более практических проблем (остаточное магнитное поле, поверхностные неоднородности, учет процессов ВП) можно рассчитывать обрести новый эффективный инструмент для геоэлектрических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Табаровский Л. А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск, Наука, 1975, 140 с.
2. Могилатов В. С. Круговой электрический диполь — новый источник для электроразведки // Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 1992, № 6, с. 97—105.
3. Могилатов В. С., Балашов Б. П. Зондирования вертикальными токами (ЗВТ) // Изв. РАН. Сер. Физика Земли, 1994, № 6, с. 73—79.
4. Могилатов В. С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика, 1993, т. 34, № 3, с. 108—117.
5. Гольдман М. М., Могилатов В. С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально-слоистое полупространство // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1978, с. 123—138.

Рекомендована к печати 3 мая 1995 г.
Ю. Н. Антоновым

Поступила в редакцию 11 марта 1994 г.,
после доработки — 5 декабря 1994 г.

V. S. Mogilatov

THEORETICAL ANALYSIS OF POTENTIALITIES OF THE METHOD OF VERTICAL CURRENT SOUNDING

A new electrical source, namely a circular electric dipole (CED), is demonstrated. Some properties and problems of the new modification of electrical prospecting, that is vertical current sounding (VCS), are discussed.

Electrical prospecting, transient electromagnetic method (TEM), circular electric dipole (CED), vertical current sounding (VCS)