

УДК 550.837

ПОЛЕ КРУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ (КЭД) ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

© 1995 г. В. С. Могилатов, А. В. Злобинский

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск

Поступила в редакцию 15.12.93 г.

Получено решение для поля кругового электрического диполя (КЭД) в произвольной горизонтально-слоистой среде в режиме постоянного тока. Показано, что КЭД является наземным аналогом вертикальной электрической линии. КЭД сравнивается также с горизонтальной электрической линией. Предполагается перспектива применения КЭД для выявления горизонтальных неоднородностей в разрезе и в методах ВП.

В работе [1] вниманию специалистов по электроразведочным методам с контролируемыми источниками был предложен новый источник – круговой электрический диполь (КЭД). Это источник, располагаемый на дневной поверхности, позволяющий ввести ток в землю строго осесимметричным образом, для чего один полюс генератора заземляется в центре, а другой равномерно по окружности с радиусом, определяемым в соответствии с глубиной исследования (рис. 1).

Нашей целью является указать на некоторые интересные особенности поля КЭД – отсутствие нормального магнитного поля на дневной поверхности (и выше), зависимость на всех разностях от вертикальной структуры разреза, повышенная глубинность относительно размеров приемно-питающей установки. Эти особенности свойственны также другому давно известному источнику – вертикальной электрической линии, и это не случайно, а, напротив, закономерно в силу одинаковой структуры полей, создаваемых круговым электрическим диполем и вертикальной электрической линией. КЭД является наземным аналогом, а в значительных областях разностей и полным эквивалентом вертикальной линии, реализовать которую можно только при наличии скважины или в морских условиях.

ПОЛЕ КЭД В ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТОМ РАЗРЕЗЕ

Сначала получим вид потенциала КЭД в однородном проводящем пространстве, рассматривая этот источник как совокупность точечного источника и кольцевого, т.е. заземленного по окружности (рис. 1). Выражение для потенциала точечного источника хорошо известно, потенциал поля источника, заземленного по окружности, найдем, рассматривая его как совокупность точечных. Пусть в неограниченной однородной сре-

де с удельным сопротивлением ρ находится точечный источник ∂I в точке $(z = z_0, r = r_0, \varphi = \varphi_0)$. Тогда потенциал в любой точке есть

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

где

$$R = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \varphi_0)},$$

или, учитывая, что

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

$$J_0(nR) = J_0(mr_0)J_0(mr) +$$

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

получим в виде ($J_k(x)$ – функция Бесселя k -го порядка)

$$\partial U = \frac{\partial I \rho}{4\pi} \left\{ \int_0^\infty J_0(mr_0)J_0(mr) \exp(-m|z - z_0|) dm + \right.$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^\infty \cos[k(\varphi - \varphi_0)] \times$$

$$\left. \int_0^\infty J_k(mr_0)J_k(mr) \exp(-m|z - z_0|) dm \right\}. \quad (2)$$

Проинтегрировав теперь по φ_0 от φ до $\varphi + 2\pi$, мы получим потенциал для источника, равномер-

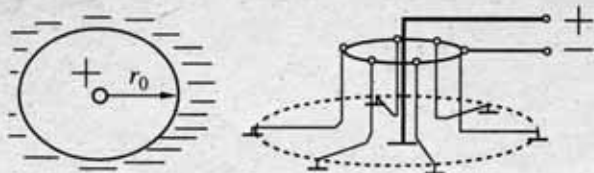


Рис. 1. Схема заземления и техническая реализация КЭД.

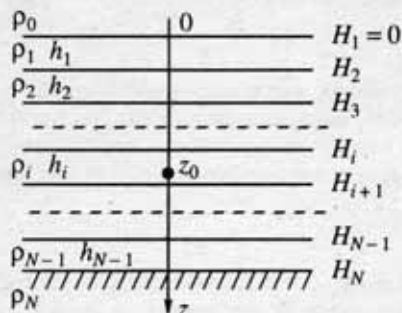


Рис. 2. Геоэлектрическая модель и система координат.

но заземленного по окружности радиуса r_0 , причем $\partial I = I d\varphi_0 / (2\pi)$, где I – полный ток.

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

При $r_0 \rightarrow 0$ получаем, разумеется, потенциал точечного источника, однако интеграл (3) не выражается в элементарных функциях:

$$U = \frac{I\rho}{4\pi} \frac{2}{\pi} \frac{K(k)}{\sqrt{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}} = \frac{I\rho}{4\pi} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; 1; k^2\right) \quad (4)$$

$$= \frac{I\rho}{4\pi} \frac{2}{\sqrt{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}},$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл, ${}_2F_1$ – гипергеометрическая функция, а

$$k = \frac{2\sqrt{rr_0}}{\sqrt{(r+r_0)^2 + (z-z_0)^2}}.$$

Определяя напряженность поля как $E = \text{grad}U$

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

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} &= \frac{E_r}{\rho}, & \frac{H_\varphi}{r} + \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} &= \frac{E_z}{\rho}, \\ \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

получим для компонент поля в однородном полупространстве:

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

где $a = -1$, если $z \geq z_0$, и $a = 1$, если $z < z_0$, а функция R имеет вид

$$R(r_0) = \begin{cases} 1 & \text{– точечный источник,} \\ J_0(mr_0) & \text{– кольцевое заземление,} \\ 1 - J_0(mr_0) & \text{– круговой электрический} \\ & \text{диполь (КЭД).} \end{cases}$$

Выражение для магнитного поля учитывает только токи в среде и не учитывает магнитное поле сторонних токов. Однако в случае кругового электрического диполя, если мы потребуем, чтобы сторонний ток имел только радиальную компоненту, это выражение дает и полное магнитное поле (на практике это осуществляется строго радиальным расположением подводящих проводов, как это показано на рис. 1).

Получим теперь решение для многослойной среды (рис. 2). В соответствии с (6) решение будем искать в виде

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{I}{4\pi} \int_0^{\infty} J_1(mr) m R(r_0) \rho(z) X(z, z_0, m) dm, \\ E_z &= \frac{I}{4\pi} \int_0^{\infty} J_0(mr) R(r_0) m \rho(z) Z(z, z_0, m) dm, \quad (7) \\ H_\varphi &= \frac{I}{4\pi} \int_0^{\infty} J_1(mr) R(r_0) F(z, z_0, m) dm, \end{aligned}$$

где функции X, F, Z удовлетворяют соотношениям

$$F'_z = mX, \quad Z = F, \quad -X'_z + mZ = 0. \quad (8)$$

Определив F , мы определим и X, Z . Задача для F достаточно известна. Полагая, что источник (точечный, кольцевой или КЭД) расположен на глубине z_0 в i -м слое, определив непрерывную

КЭД	ВЭЛ	
r_0	z_1	z_2
100 м	0	200 м
MN	MN	
100 м	100 м	
Ток	Ток	
100 А	13 А	
Среда		
N	ρ , Ом м	H, м
1	10	1000
2	∞	∞

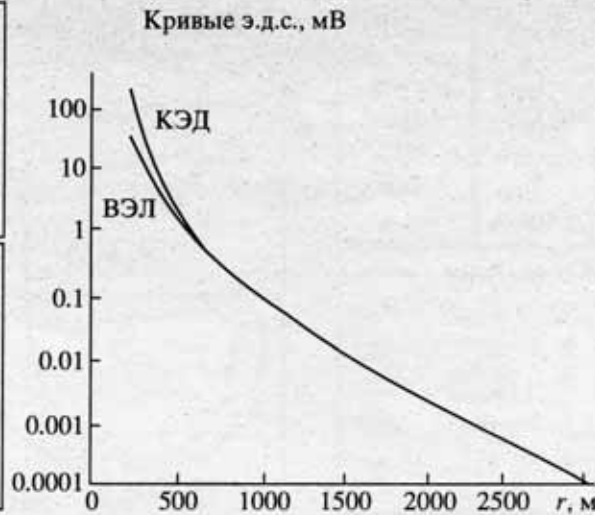


Рис. 3.

функцию $V = F_2 \rho$, получим в области над источником

$$F_1(z) = F_{1j} \operatorname{ch}[m(z - H_j)] + V_{1j} \frac{1}{\rho_j m} \operatorname{sh}[m(z - H_j)],$$

$$V_1(z) = F_{1j} \rho_j m \operatorname{sh}[m(z - H_j)] + V_{1j} \operatorname{ch}[m(z - H_j)],$$

$$F_{11} = 1 / (\rho_0 m), \quad V_{11} = 1,$$

$$F_{1j+1} = F_{1j} \operatorname{ch}(mh_j) + V_{1j} \frac{1}{\rho_j m} \operatorname{sh}(mh_j),$$

$$V_{1j+1} = F_{1j} \rho_j m \operatorname{sh}(mh_j) + V_{1j} \operatorname{ch}(mh_j),$$

$$j = 1, 2, \dots, i - 1,$$

и под источником

$$F_2(z) = F_{2j+1} \operatorname{ch}[m(H_{j+1} - z)] -$$

$$- V_{2j+1} \frac{1}{\rho_j m} \operatorname{sh}[m(H_{j+1} - z)],$$

$$V_2(z) = -F_{2j+1} \rho_j m \operatorname{sh}[m(H_{j+1} - z)] +$$

$$+ V_{2j+1} \operatorname{ch}[m(H_{j+1} - z)],$$

$$F_{2N} = -1 / (\rho_N m), \quad V_{2N} = 1,$$

$$F_{2j} = F_{2j+1} \operatorname{ch}(mh_j) - V_{2j+1} \frac{1}{\rho_j m} \operatorname{sh}(mh_j),$$

$$V_{2j} = -F_{2j+1} \rho_j m \operatorname{sh}(mh_j) + V_{2j+1} \operatorname{ch}(mh_j),$$

$$j = i + 1, \dots, N - 1,$$

где $h_j = H_{j+1} - H_j$ ($j = 1, 2, \dots, N - 1$), а условия при $z = z_0$ (в источнике) удовлетворятся, если решение над источником умножить на

$$C_1 = 2 \frac{V_2(z_0)}{F_1(z_0)V_2(z_0) - F_2(z_0)V_1(z_0)} \quad (11)$$

и под источником на

$$C_2 = 2 \frac{V_1(z_0)}{F_1(z_0)V_2(z_0) - F_2(z_0)V_1(z_0)}. \quad (12)$$

Рассмотрим частный случай, когда источник и приемник находятся на дневной поверхности ($z_0 = 0, z = 0, \rho_0 = \infty$):

$$F(0) = C_1 F_{11} = 0, \quad V(0) = C_1 V_{11} = C_1,$$

$$x(0) = V(0) / (\rho_1 m) = C_1 / (\rho_1 m), \quad (13)$$

$$z(0) = F(0) = 0, \quad C_1 = -2V_{21} / F_{21}.$$

Итак, учитывая выражения для компонент поля (7), получаем, что магнитное поле для любого горизонтально-слоистого разреза на дневной поверхности и выше отсутствует. Но магнитное поле появится в случае любого нарушения (кроме маловероятного осесимметричного) горизонтальной однородности. Это качество поля КЭД создает интересные перспективы применения этой питающей установки для выявления этих нарушений.

КЭД И ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ

Мы уже говорили, что поле КЭД по своей структуре (линии тока замыкаются в вертикальных плоскостях) похоже на поле вертикальной электрической линии (ВЭЛ). Посмотрим, насколько далеко простирается это сходство. На рис. 3 представлены профильные кривые э.д.с. для КЭД и ВЭЛ. Разнос отнесен к середине линии MN. Подобрав соответствующим образом ток (параметры установок даны на рисунке), выбор которого определяется также и тем, что КЭД — наземная установка, а ВЭЛ заземляется в скважи-

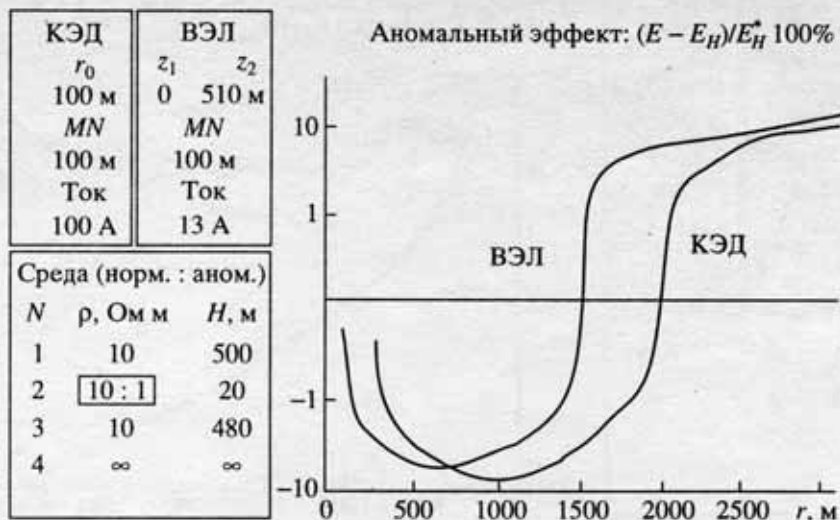


Рис. 4.

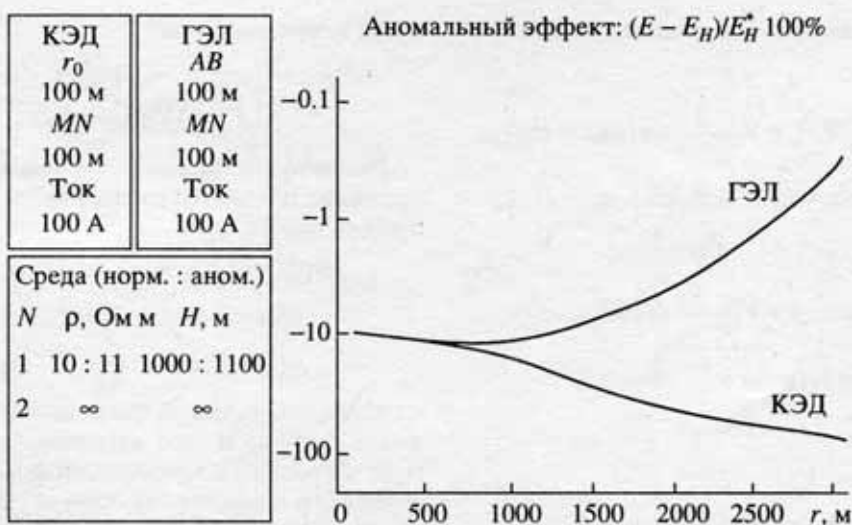


Рис. 5.

не, мы добились практически полного совпадения с разноса 500 м. В [2] было показано, что поле ВЭЛ в средах с изолирующим основанием на больших разносах спадает экспоненциально, в частности, в двухслойной среде спад определяется функцией $\exp(-\pi r/H)$. Мы утверждаем, что сказанное относится и к круговому электрическому диполью, и на рис. 3 демонстрируется это.

Таким образом, возникает интересная возможность заменить в некоторых случаях скважинную установку наземной. Конечно, этот вопрос нуждается в подробном изучении, а здесь мы сравним аномальные эффекты от проводящего объекта (неограниченного пласта) при применении КЭД и ВЭЛ, причем ВЭЛ заземлен верхним электродом в устье скважины, а нижний заземлен

непосредственно в проводящий пласт (как это делается в методе заряда). На рис. 4 приведены кривые относительного аномального эффекта. В общем они весьма похожи. На каждой из них выделяются две зоны повышенного аномального эффекта – ближняя и дальняя. В дальней зоне, где из-за наличия непроводящего основания действует экспоненциальный закон спада, показатель которого определяется наличием или отсутствием объекта, аномальный эффект растет также экспоненциально, но здесь практически неизмеримы сигналы. В ближней зоне максимальные аномальные эффекты примерно одинаковы (ВЭЛ – 8.8% при $r = 700$ м, КЭД – 9.4% при $r = 1000$ м). В определенном смысле наземная установка – КЭД эквивалентна здесь скважинной – ВЭЛ. Разумеется, если проблема состоит в том, чтобы опреде-

лять край протяженного объекта, то нашим примером вопрос не решен и нуждается в дальнейшем изучении.

КЭД И ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ЛИНИЯ

Интересно также сравнить установку КЭД с другими наземными электрическими установками. Большая их часть основана на использовании горизонтальной электрической линии (ГЭЛ). Покажем, что поле КЭД имеет принципиально другой характер, чем поле ГЭЛ. На рис. 5 приведены кривые относительного аномального эффекта для КЭД и ГЭЛ. Аномалия образуется за счет изменения параметров двухслойного разреза таким образом, что продольная проводимость ($S = H/\rho$) не меняется. На малых разнотах аномальный эффект одинаков (~10%) для обеих установок и отражает только изменение удельного сопротивления. Но с увеличением разностей аномальный эффект в случае КЭД растет, и растет неограниченно, реагируя на изменение мощности, тогда как для ГЭЛ аномальный эффект затухает. Это выражение того факта, что для поля КЭД всегда важна вертикальная структура среды, вертикальный размер, в отличие от полей традиционных источников, которые отражают на больших разнотах (или в поздней стадии становления) лишь величину суммарной продольной проводимости.

Заметим здесь, что на раскладку установки КЭД километровой радиуса требуется столько же провода и заземлений (в весовом выражении), сколько и на километровую линию при одинаковом токе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели довольно беглый сравнительный анализ свойств поля кругового электрического диполя на постоянном токе в условиях горизонтальной однородности разреза. В целом можно сделать весьма интересное заключение – с одной стороны, поле КЭД обладает высокой аномалеобразующей способностью, а с другой стороны, реакция горизонтально-слоистой среды на КЭД, как источник, в абсолютном выражении слаба на дневной поверхности, а магнитного поля и вовсе нет. Но тогда следует ожидать яркого проявления нарушений горизонтальной однородности на этом слабом фоне.

И еще, электродинамический отклик горизонтально-слоистой среды (на дневной поверхности) при применении КЭД ослаблен. Однако ток в землю уходит, причем КЭД создает повышенную интенсивность плотности тока на большой глубине под собой. Эти обстоятельства создают благоприятные условия для выявления эффектов ВП, особенно в режиме установления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Могилатов В.С.* Круговой электрический диполь – новый источник для электроразведки // *Физика Земли*. 1992. № 6. С. 97 - 105.
2. *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 // *Сб. научных трудов. ИГиГ СО АН СССР*. Новосибирск, 1978. С. 123 - 138.