

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРЯМОГО И ВТОРИЧНОГО СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

В. В. Сочельников, А. Г. Небрат, А. А. Архипов, А. В. Кондюрин

Теоретические оценки прямого и вторичного сейсмоэлектрических эффектов в осадочных породах даны в работе [5]. Прямой сейсмоэлектрический эффект (СЭЭФ) по физической природе является аналогом потенциала протекания и возбуждается сейсмическим источником. Вторичный сейсмоэлектрический эффект (ВСЭЭФ) имеет своим источником первичное электрическое возбуждение, вызывающее обратный СЭЭФ, являющийся аналогом электроосмоса. Возникающие при этом сейсмические колебания микропор приводят к появлению вторичных электрических колебаний.

Теоретические оценки прямого СЭЭФ хорошо согласуются с известными натурными результатами [3]. Оценки вторичного СЭЭФ за счет обратного сейсмоэлектрического эффекта позволили объяснить возникновение основной массы осцилляций переходных характеристик в методе становления поля.

Однако оценки выполнены на уровне электрического потенциала в месте расположения источника возбуждения, что соответствует сигналу в приемной установке с бесконечно длинной базой. Ввиду важности обоих эффектов для геофизической теории и практики в настоящей работе предлагаются теоретические оценки электрического поля в сравнении с проведенными нами экспериментальными исследованиями.

ПРЯМОЙ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Модель прямого СЭЭФ представлена на рис. 1 (см. цвет. вкл.). Горизонтальный электрически активный слой мощностью h расположен на глубине H в однородном полупространстве. Введем цилиндрическую систему координат r, φ, z с началом на подошве слоя и с осью z , направленной вертикально вверх. Сейсмический источник продольной волны располагается на поверхности среды на оси z в точке A . $M(r, \varphi, z)$ - точка наблюдения. $M_1(r_1, \varphi_1, z_1)$ - переменная точка интегрирования.

В соответствии с [5] электрический потенциал в точке M

$$U(M) = \int_{V_1}^{\delta d V_1} \frac{R_1}{R_1}, \quad (1)$$

где V_1 - объем слоя, R_1 - расстояние между точками M_1 и M , δ - плотность зарядов в слое за счет прямого СЭЭФ:

$$\delta = \frac{4\alpha\sigma\bar{u}}{r_0^2}, \quad (2)$$

где α - коэффициент пористости, σ - поверхностная плотность заряда в капиллярах, r_0 - радиус пор, \bar{u} - амплитуда колебаний толщины горизонтальных пор:

$$\bar{u} = u_0 \frac{R_0}{R} e^{-\alpha(R-R_0)} \cos \psi, \quad (3)$$

R_0 - расстояние, на котором амплитуда смещения в сейсмической волне равна u_0 , α - коэффициент поглощения, ψ - угол падения волны, R - расстояние между точками A и M_1 .

Из рис. 1 очевидно:

$$R = \sqrt{r_1^2 + (H + h - z_1)^2}; \quad \cos \psi = \frac{H + h - z_1}{R}. \quad (4)$$

Расстояние между точками M_1 и M в цилиндрических координатах

$$R = \sqrt{(r \cos \varphi - r_1 \cos \varphi_1)^2 + (r \sin \varphi - r_1 \sin \varphi_1)^2 + (z - z_1)^2}.$$

Из симметрии задачи следует, что потенциал U не зависит от координаты φ . Поэтому в последнем выражении можно положить $\varphi = 0$ и

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z - z_1)^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi_1}. \quad (5)$$

Подставляя (2) и (5) в (1) с учетом (3) и (4), получаем выражение для потенциала

$$U(r, z) = \frac{4\alpha\sigma}{r_0^2} u_0 R_0 e^{\alpha_0 R_0} J_0(r, z),$$

где

$$J_0(r, z) = 2 \int_0^{\pi} d\varphi_1 \int_0^h (H + h - z_1) dz_1 \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{e^{-\alpha \sqrt{r_1^2 + (H+h-z)^2}} r_1 dr_1}{\left[r_1^2 + (H + h - z_1)^2 \right] \sqrt{r^2 + (z - z_1)^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi_1}}.$$

Следуя [2], будем считать активный слой границей формационного объекта, т. е. перерыва осадконакопления.

Тогда $h \ll H$, $z_1 \ll H$, $z_1 \ll z$ и

$$J_0(r, z) = 2 \int_0^{\pi} d\varphi_1 \int_0^{\infty} \frac{e^{-\alpha \sqrt{r_1^2 + H^2}} r_1 dr_1}{(r_1^2 + H^2) \sqrt{r^2 + z^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi_1}}.$$

Выражение для потенциала теперь можно переписать в виде:

$$U(r, z) = K J(r, z),$$

где

$$K = \frac{8\alpha H h \sigma}{r_0^2} u_0 R_0 e^{\alpha R_0}, \quad (6)$$

$$J(r, z) = \int_0^\pi d\varphi_1 \int_0^\infty \frac{e^{-\alpha \sqrt{r_1^2 + H^2}} r_1 dr_1}{(r_1^2 + H^2) \sqrt{r^2 + z^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi_1}}.$$

Переходя к напряженности электрического поля, имеем:

$$E_r = K J_r,$$

где

$$J_r = \int_0^\pi d\varphi_1 \int_0^\infty \frac{(r - r_1 \cos \varphi_1) e^{-\alpha \sqrt{r_1^2 + H^2}} r_1 dr_1}{(r_1^2 + H^2) (r^2 + z^2 + r_1^2 - 2rr_1 \cos \varphi_1)^{3/2}}. \quad (7)$$

Значение α в горных породах имеет порядок 10^{-2} км $^{-1}$ [1]. Очевидно, для небольших глубин исследования (< 10 км) для теоретических оценок СЭЭФ можно положить $\alpha = 0$. Кроме того, наблюдения обычно проводятся на поверхности среды. Поэтому положим в (6) и (7) $\alpha = 0$, $z = H$ и нормируем по H ($r/H = \rho$, $r_1/H = \rho_1$). В результате с учетом отражения относительно плоскости $z = H$ получим:

$$E_r = \bar{K} e_r, \quad (8)$$

где

$$\bar{K} = \frac{16\alpha h \sigma}{r_0^2 H} u_0 R_0; \quad (9)$$

$$e_r(r) = \int_0^\pi d\varphi_1 \int_0^\infty \frac{(\rho - \rho_1 \cos \varphi_1) \rho_1 d\rho_1}{(1 + \rho_1^2)(1 + \rho^2 + \rho_1^2 - 2\rho\rho_1 \cos \varphi_1)^{3/2}}. \quad (10)$$

Здесь $\rho = r/H$.

В частном случае при $r = 0$ $e_r(0) = 0$.

Для практических оценок, как и в работе [5], положим: $\alpha = 0,1$, $\sigma = 0,01$ Кл/м 2 , $r_0 = 10$ мкм, $h = 0,1$ м, $H = 2$ км, $u_0 = 10^{-4}$ мкм при $R_0 = 1$ км.

Из (9) имеем $\bar{K} = 800$ мкВ/м.

Результаты расчетов по формулам (8), (10) для полученной оценки \bar{K} представлены на рис. 2. Горизонтальная составляющая E_r равна нулю при $r = 0$, достигает максимума - 300 мкВ/м при $r/H = 1,5$ и далее убывает с ростом этого отношения.

На рис. 3 (см. цвет. вкл.) представлены результаты измерений горизонтальной составляющей электрического поля в прямом СЭЭФ. Эксперимент проводился в прибрежной зоне Азовского моря. Источник возбуждения упругих колебаний - пневмопушка, объем - 1,5 л, рабочее давление - 140 атм. Электромагнитное поле измерялось стандартной электроразведочной косой,

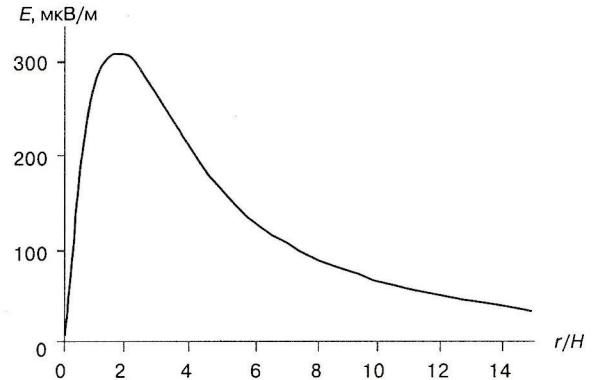


Рис. 2. Теоретическая кривая напряженности электрического поля прямого СЭЭФ

$MN = 50$ м, с заземленными неполяризующимися графитопластовыми датчиками. В связи с высоким уровнем электромагнитных помех (линия электропередачи в 20 м от приемных датчиков) работы проводились в режиме накопления до 20 - 30 подрывов на один суммоимпульс, для чего были синхронизованы работы пневмоисточника и ЦЭС-2. На рис. 3 представлены 23 суммоимпульса, зарегистрированные при одном положении приемной косы. Надежная корреляция сигнала амплитудой до 10 - 15 мкВ по 23 независимым испытаниям на временах 0,4 и 1,46 с говорит о неслучайном характере измеряемого процесса.

Амплитудные значения электрических сигналов, представленные на рис. 3, хорошо согласуются с теоретическими оценками (см. рис. 2) при соответствующих значениях r/H .

ВТОРИЧНЫЙ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Оценку электрического поля вторичного СЭЭФ проведем на примере установки *AMNB*, которая наиболее широко применяется в морской электроразведке методом ЗСБ. Модель возбуждения представлена на рис. 4 (см. цвет. вкл.). Резкие изменения электрического поля приводят к возникновению сейсмических напряжений (обратный СЭЭФ). В соответствии с [5] нормальная к напластованию составляющая этих напряжений и вызывает появление вторичного электрического поля (вторичный СЭЭФ). Нормальная составляющая механического напряжения возникает как за счет вертикальной составляющей первичного электрического поля $E_z^{взб}$, так и за счет горизонтальной составляющей $E_x^{взб}$ [4]. В итоге составляющая $E_z^{взб}$ приводит к возникновению горизонтальной составляющей вторичного электрического поля, а составляющая $E_x^{взб}$ - к возникновению вертикальной составляющей (см. рис. 4).

Симметрия задачи (см. рис. 4) позволяет заключить, что можно рассматривать возбуждение за счет одного электрода *A* (см. рис. 3) с удвоенной силой тока $2I$. В соответствии с [4] вертикальная составляющая механического напряжения за счет вертикальной составляющей $E_z^{взб}$

$$T_{zz} = K_{z\text{эм}} E_z^{взб} = \frac{I_p}{\pi R^2} \cos \psi K_{z\text{эм}},$$

а за счет горизонтальной составляющей $E_r^{\text{взб}}$

$$T_{rz} = K_{r\text{эм}} E_r^{\text{взб}} = \frac{I\rho}{\pi R^2} \sin \psi K_{r\text{эм}}.$$

Здесь ρ - удельное электрическое сопротивление среды, $K_{z\text{эм}}$, $K_{r\text{эм}}$ - коэффициенты электромеханической связи, причем в соответствии с [4]

$$K_{r\text{эм}} \approx 2 K_{z\text{эм}}.$$

Этим напряжениям будут соответствовать поперечные смещения

$$\bar{u} = K_T T = \frac{\rho I}{\pi R^2}, \quad K_T \begin{cases} \cos \psi K_{z\text{эм}}, \\ \sin \psi K_{r\text{эм}}. \end{cases}$$

Поперечные колебания пор вызывают появление вторичных электрических зарядов (2):

$$\delta = \frac{4\rho I \alpha \sigma K_T}{\rho R^2 r_0^2} \begin{cases} \cos \psi K_{z\text{эм}}, \\ \sin \psi K_{r\text{эм}}. \end{cases}$$

С учетом отражения этих зарядов относительно плоскости $Z = H + h$ можно заключить, что вертикальная составляющая электрического поля в плоскости наблюдения равна нуля, а горизонтальная - удваивается.

Поступая далее так же, как в предыдущем разделе, получаем выражение для горизонтальной составляющей напряженности электрического поля вторичного СЭЭФ в установке *AMNB*:

$$E_x = K_x e_x, \quad (11)$$

где

$$K_x = \frac{16\rho I h \alpha \sigma K_T K_{x\text{эм}}}{\pi r_0^2 H^2}, \quad (12)$$

$$e_x(x) = \int_0^\pi d\phi_1 \int_0^\infty \frac{(\xi - p_1 \cos \phi_1) p_1 dp_1}{(1 + p_1^2)^{3/2} (1 + \xi^2 + p_1^2 - 2\xi p_1 \cos \phi_1)^{1/2}}. \quad (13)$$

Здесь $\xi = x/H = AB/2H$.

В частном случае при $x = 0$ $e_x(0) = 0$.

Для практических оценок, как и в работе [5], положим: $\alpha = 0,1$, $\sigma = 0,01 \text{ Кл}/\text{м}^2$, $r_0 = 10 \text{ мкм}$, $h = 0,1 \text{ м}$, $H = 2 \text{ км}$, $\rho = 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $I = 200 \text{ А}$, $K_T = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{Н}$, $K_{z\text{эм}} = 0,1 \text{ Н}/(\text{В} \cdot \text{м})$.

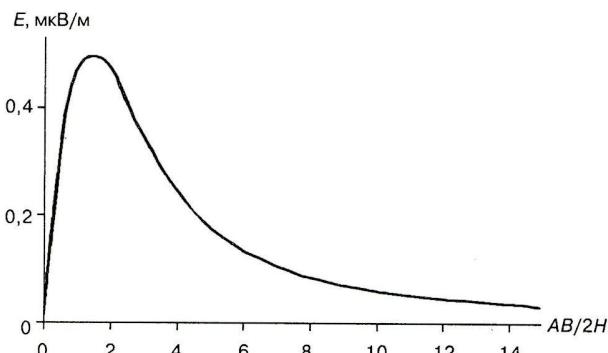


Рис. 5. Теоретическая кривая напряженности электрического поля вторичного СЭЭФ

Из (12) имеем $K_x = 3,2 \text{ мкВ/м}$.

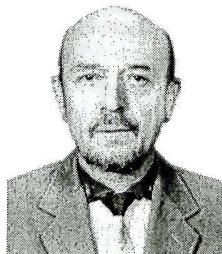
Результаты расчетов по формулам (11, 13) для полученной оценки K_x представлены на рис. 5. Горизонтальная составляющая E_x равна нулю при $x = 0$, достигает максимума $\approx 0,48 \text{ мкВ/м}$ при $AB/2H = 1,5$ и далее убывает с ростом отношения $AB/2H$. Полученные оценки хорошо согласуются с практическими результатами, опубликованными ранее [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 98-05-64053).

ЛИТЕРАТУРА

- Галкин И. Н., 1972, Построение сейсмической модели земной коры: Наука.
- Мушин И. А., Сафонов А. С., 1995, Геологические предпосылки создания структурно-формационных моделей в сейсмо- и электроразведке: Доклад на международной конференции Неклассическая геоэлектрика: Саратов.
- Нейштадт Н. М., Мазанова З. В., Суворов Н. Д., 1992, Сейсмо- и пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике: СПб, Недра.
- Полякова Т. А., Черняк Г. А., 1984, О некоторых особенностях сейсмоэлектрического эффекта в маловлажных осадочных породах. Деп. ВИНТИ.
- Сочельников В. В., Небрат А. Г., 1997, Теоретические оценки сейсмоэлектрического эффекта и его влияния на переходные характеристики становления поля: Геофизика, 2, 28 - 38.

ОБ АВТОРАХ



Виктор Васильевич
СОЧЕЛЬНИКОВ

Доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Окончил геофизический факультет МГРИ (1961) и механико-математический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова (1969). Основные направления исследований - разработка теоретических основ геофизических методов с применением низкочастотных электромагнитных и тепловых полей для изучения глубинного строения Земли и поисков месторождений нефти и газа. Автор более 100 опубликованных научных трудов и изобретений.



Александр Григорьевич
НЕБРАТ

Кандидат геол.-минер. наук, заведующий лабораторией НИИП океангеофизика. Окончил геологический факультет МГУ (1974). Основные направления исследований - применение электромагнитных полей для поиска месторождений нефти и газа. Автор 12 опубликованных научных работ и изобретений.



**Алексей Александрович
АРХИПОВ**

Директор НПП "Геошельф", кандидат технических наук. Окончил геологический факультет Казанского университета в 1971 г. Занимается разработкой технологий морской многоволновой сейморазведки и проблемами комплексирования геофизических методов.



**Алексей Викторович
КОНДЮРИН**

Научный сотрудник Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Окончил в 1971 г. МГРИ. Основные направления исследований - применение методов МТЗ и ТП (теплового потока) при исследовании глубинного строения Земли.

КОММЕНТАРИИ К СТАТЬЕ

"Теоретические и экспериментальные оценки электрического поля прямого и вторичного сейсмоэлектрических эффектов"

Комментируемая статья в своей теоретической части полностью основывается на ранее опубликованной в нашем журнале ("Геофизика", № 2, 1997) статье В. В. Сочельникова и А. Г. Небрата.

По сравнению с последней в новой статье проведен полезный, но непринципиальный переход от потенциала к напряженности электрического поля. Между тем предлагаемая авторами теоретическая основа сейсмоэлектрического эффекта требует коренной переработки. Хотя авторы и ссылаются на явление обратного электроосмоса, лежащего в основе этого эффекта, однако его физическое и математическое описание не может не вызвать возражений. В представлении авторов это явление сводится к деформации упругим полем цилиндрических пор конечной длины, в результате чего заряженная внутриворовая жидкость приходит в движение и возникает "дополнительный" (?) заряд, который и создает электрическое поле. При этом авторы забывают, что в пористой среде (горной породе) заряжены не только жидкость, но и твердый скелет, а в целом порода остается нейтральной. Авторов не смущает, что в результате появления "дополнительного" заряда нарушается закон его сохранения и где-то (а в данном случае в пределах рассматриваемой поры или в ее окрестности) должен появиться заряд противоположного знака. В свя-

зи с вышеизложенным теоретические выводы авторов статьи следует поставить под сомнение.

Несколько удивляет, что авторы игнорируют ранее проведенные теоретические исследования сейсмоэлектрического эффекта в пористой влагонасыщенной среде и, в частности, основополагающую и далеко опередившую свое время работу Я. И. Френкеля "К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве" (Изв. АН СССР. География и геофизика, 1944, т. 8, № 4, 133 - 150). В последующие годы появился целый ряд публикаций российских и зарубежных ученых, развивающих его идеи. Среди них: В. Н. Николаевский, Н. И. Гершензон, В. В. Корнильев, М. А. Биот, S. Pride и др. Ссылки на работы этих ученых можно найти в также посвященной этому вопросу работе Б. С. Светова и В. П. Губатенко "Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах" (Физика Земли, 1999, № 9).

Редакция, тем не менее, считает полезным публикацию настоящей статьи, поскольку в ней содержатся ценные экспериментальные результаты, а читатель лучше представит себе, как развивается теоретическая мысль в этом непростом направлении.

Член редакции Б. С. Светов.