Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/04TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/04TVN115>)

УДК 550.837

Московский Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Россия, Саратов¹

Доцент, кандидат физико-математических наук

E-mail: mosig@mail.ru

Балабан Олег Михайлович

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Россия, Саратов

Доцент кафедры «Прикладная математика и системный анализ»

Кандидат технических наук

E-mail: ombal@mail.ru

Федорова Ольга Сергеевна

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Россия, Саратов

Доцент кафедры «Прикладная математика и системный анализ»

Кандидат физико-математических наук

E-mail: olga.s.fedorova@gmail.com

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Россия, г. Пермь

Профессор, доктор технических наук

E-mail: soni.81@mail.ru

Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах

¹ 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

Аннотация. В рамках низкочастотной модели сейсмoeлектрического эффекта второго рода получены аналитические решения для электромагнитного поля этого эффекта при возбуждении плоских продольных упругих волн в трехслойной среде с латерально-неоднородным влагонасыщенным вторым слоем. Рассмотрена методика построения аналитических решений сейсмoeлектрического эффекта в низкочастотном приближении, основанная на последовательном решении задач теории упругости в сплошной среде, флюидодинамики в пористой влагонасыщенной проницаемой среде, электрокинетики и электродинамики.

Проведен анализ полученных аналитических решений, показано что, если в горизонтально-слоистой среде первый слой не содержит влаги, то сейсмoeлектрический эффект второго рода на дневной поверхности и в первом слое наблюдается только при условии, если параметры влагонасыщенного слоя изменяются по латерали. На основании полученных результатов высказаны рекомендации по использованию регистрации сейсмoeлектрического эффекта второго рода для локализации областей резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенных пластов.

Ключевые слова: сейсмoeлектрический эффект второго рода; влагонасыщенные горные породы; плоские упругие волны; электромагнитные поля; латерально-неоднородные среды; проницаемость горных пород; аналитические решения.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Московский И.Г., Балабан О.М., Федорова О.С., Кочетков А.В. Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015)
<http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04TVN115

Введение

Сейсмoeлектрический эффект второго рода представляет собой явление возбуждения электромагнитного поля при распространении механических колебаний в пористых влагонасыщенных горных породах. Электромагнитные поля этого эффекта, измеряемые на поверхности Земли, либо внутри скважины несут информацию о глубине залегания влагонасыщенной породы, ее флюидосодержании, пористости, проницаемости и других петрофизических параметрах. Данная связь определяет стремление использовать сейсмoeлектрический эффект при решении разнообразных прикладных задач инженерной и нефтегазовой геологии, геофизики и геодинамики.

Сейсмoeлектрический эффект второго рода экспериментально открыт А.Г. Ивановым в 1939 г. [1]. Теория сейсмoeлектрического эффекта второго рода основывается на работах Я.И. Френкеля [2] и М. Био [3]. В дальнейшем теория получила свое развитие в работах С. Прайда и М. Хаартсена [4, 5]. Согласно вышеперечисленным работам определение упругих и электромагнитных полей сейсмoeлектрического эффекта сводится к решению самосогласованной задачи, где учитывается взаимное влияние полей. Решение такой задачи возможно только численными методами, кроме того, модель Био, распространения упругих волн в пористых средах, является высокочастотной, что не отвечает применяемым в наземной геофизике источникам возбуждения упругих волн.

В работах [6, 7] предложена низкочастотная математическая модель сейсмoeлектрического эффекта второго рода, в которой задача о нахождении полей данного эффекта распадается на три последовательно решаемые подзадачи:

- 1) теории упругости в сплошной среде;
- 2) флюидодинамики в пористой влагонасыщенной проницаемой среде и электрокинетики (нахождение тока, возникающего при движении минерализованной жидкости в пористой среде);
- 3) электродинамики (нахождение электромагнитного поля, возбуждаемого электрокинетическим током).

Преимущество такого подхода по сравнению с ранее известными [2-5] состоит в существенном упрощении расчета электромагнитного поля в низкочастотном приближении и за счет пренебрежения обратным воздействием порождаемых в этой цепочке физических полей. В данной статье на основе низкочастотной математической модели [6, 7] получены аналитические решения для электромагнитного поля сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн в пористых влагонасыщенных горизонтально-слоистых средах. На основе полученных решений проведены расчеты компонент упругого и электромагнитного полей при гармоническом и импульсном возбуждении упругих волн плоским источником.

1. Низкочастотная математическая модель сейсмoeлектрического эффекта второго рода

Согласно [6, 7], задача расчета компонент электромагнитного поля сейсмoeлектрического эффекта второго рода в низкочастотном приближении распадается на три последовательно решаемые подзадачи.

На первом этапе решается задача теории упругости сплошных сред для эффективных параметров пористой флюидонасыщенной среды Гассмана [8], которой является горная порода, состоящая из твердой фазы (скелета) и пор, заполненных электролитом. Эффективные параметры среды определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\rho &= m_0 \rho^f + (1 - m_0) \rho^s, \\ K &= K^s \frac{m_0 K^s \bar{K} - (1 + m_0) K^f \bar{K} + K^f K^s}{m_0 K^{s^2} \bar{K} + (1 - m_0) K^f K^s - K^f \bar{K}}, \\ \mu &= \bar{\mu},\end{aligned}$$

где ρ , K и μ – эффективные плотность, модули всестороннего сжатия и сдвига, соответственно; ρ^s , K^s – плотность и модуль всестороннего сжатия твердой матрицы; ρ^f , K^f – плотность и модуль всестороннего сжатия электролита; m_0 – пористость породы; $\bar{K}$, $\bar{\mu}$ – модули всестороннего сжатия и сдвига скелета породы (т.е. сухой горной породы, поры которой заполнены, например, газом).

Вектор смещения $\mathbf{u}^s$ в твердой матрице влагонасыщенного пласта для гармонически изменяющихся полей (фактор изменения во времени $e^{-i\omega t}$) определяется из уравнения Ламе:

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } \mathbf{u}^s - \mu \text{rot rot } \mathbf{u}^s + \rho \omega^2 \mathbf{u}^s + \rho \mathbf{F} = 0, \quad (1)$$

где $\lambda = K - (2/3)\mu$ и μ – параметры Ламе (μ совпадает с модулем сдвига), а $\mathbf{F}$ – вектор плотности внешних объемных сил. Уравнение (1) дополняется условиями сопряжения на поверхностях раздела слоев, обеспечивающими жесткость сцепления между слоями и равенство приложенных к границе сил.

Задавая обычное на дневной поверхности краевое условие и условие на бесконечности, получаем полную формулировку упругой задачи для горизонтально-слоистой среды, позволяющую найти вектор смещения твердой фазы $\mathbf{u}^s$.

На втором этапе используя результаты работы [9], находится решение задачи флюидодинамики в пористой среде:

$$\mathbf{v}^f = -\frac{1}{a} \text{grad } p + \frac{b}{a} \mathbf{v}^s, \quad (2)$$

$$\text{div } \mathbf{v}^f = -i\omega c p + d \text{div } \mathbf{v}^s, \quad (3)$$

где $\mathbf{v}^s$, $\mathbf{v}^f$ – скорости смещения твердой и жидкой фаз; p – поровое давление в жидкости. Промежуточные параметры a , b , c , d определяются равенствами

$$\begin{aligned}a &= \frac{\eta m_0}{k} - i\omega \rho^f, \quad b = \frac{\eta m_0}{k}, \\ c &= \frac{1}{m_0 K^s} \left[\frac{\bar{K}}{K^s} - (1 - m_0) - m_0 \frac{K^s}{K^f} \right], \quad d = \frac{1}{m_0} \left[\frac{\bar{K}}{K^s} - (1 - m_0) \right],\end{aligned}$$

где k – проницаемость среды, η – динамическая вязкость жидкости.

Исключая из уравнений (2) и (3) скорость $\mathbf{v}^f$, получаем скалярное уравнение относительно p :

$$\Delta p + \chi^2 p = A \operatorname{div} \mathbf{v}^s, \quad (4)$$

где $\chi^2 = -i\omega c a$, $A = b - ad$.

Уравнение (4) для влагонасыщенного слоя дополняется краевыми условиями на границах пласта, допускающих свободное истечение жидкости (например, на дневной поверхности):

$$p = 0,$$

и непроницаемых для жидкости:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = b v_n^s,$$

где v_n^s – компонента скорости $\mathbf{v}^s$ перпендикулярная к границе пласта. Дополняя эти условия условием на бесконечности: $p \rightarrow 0$, получаем полную формулировку скалярной задачи для давления в жидкости. Определив поровое давление p , из соотношения (2) можно найти скорость движения жидкости $\mathbf{v}^f$. Тогда плотность электрокинетического тока $\mathbf{j}$, порождающего сейсмоэлектрический эффект второго рода может быть найдена из равенства

$$\mathbf{j} = -Q\theta(\mathbf{v}^f - \mathbf{v}^s),$$

где Q – поверхностная плотность электрического заряда, адсорбированного на поверхности твердой матрицы, $\theta = S_w/V$ – удельная поверхность пор; S_w – площадь поверхности, отделяющей твердую матрицу от флюида в объеме V .

На последнем этапе определяются электромагнитные поля, возбуждаемые электрокинетическим током $\mathbf{j}$, из решения системы уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}, \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{H}, \quad (6)$$

с известными условиями сопряжения на поверхностях раздела сред с различными физическими свойствами и условиями в бесконечности. В уравнениях (5) и (6) $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ – напряженности электрического и магнитного полей, σ – электропроводность среды, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

2. Электромагнитное поле сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн во влагонасыщенном полупространстве

Пусть в однородном влагонасыщенном полупространстве (рис. 1) возбуждается монохроматическая плоская продольная упругая волна с круговой частотой ω вектором $\mathbf{F}$ внешних объемных сил

$$\mathbf{F} = \mathbf{e}_z P_0 \delta(z) e^{-i\omega t},$$

где $\mathbf{e}_z$ – единичный орт, направленный вдоль оси Oz , P_0 – амплитуда силы, действующей на единицу поверхности $z = 0$, $\delta(z)$ – функция Дирака, t – время. Поверхность $z = 0$ будем полагать непроницаемой для жидкости.

Рис. 1. Влагонасыщенное полупространство

Комплексная амплитуда $\mathbf{u}^s$ вектора смещения имеет лишь вертикальную компоненту, равную

$$u_z^s = u_p^0 e^{ik_p z}, \quad (7)$$

где $u_p^0 = \frac{iP_0}{\omega \sqrt{\rho(\lambda + 2\mu)}}$; $k_p = \omega \sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}$ – волновое число продольной волны;

$\lambda = K - \frac{2}{3}\mu$ – коэффициент Ламе; ρ , K и μ – эффективные плотность, модули всестороннего сжатия и сдвига влагонасыщенного полупространства. В этом случае нетрудно показать [7], что будет возбуждаться только вертикальная компонента электрического поля E_z в области локализации сторонних токов:

$$E_z = \frac{k_p u_p^0}{a\sigma} \left[A_1 e^{ik_p z} + A_2 e^{i\chi z} \right], \quad (8)$$

$$\text{где } k_p = Q\theta, \quad A_1 = \left(\omega^2 \rho^f - \frac{i\omega k_p^2 A}{\chi^2 - k_p^2} \right); \quad A_2 = i\omega \left(b + \frac{k_p^2 A}{\chi^2 - k_p^2} \right); \quad \chi = \sqrt{-i\omega a c},$$

$\text{Im}\chi > 0$ – волновое число флюидодинамической волны порового давления, σ – электропроводность влагонасыщенного полупространства.

Из (8) следует существование двух типов волн. Волновому числу k_p соответствует электрическая волна, порожденная продольной упругой волной и распространяющаяся вместе с ней («вмороженная» в нее), а волновому числу χ – «медленная» волна (в терминологии Био), порожденная волной порового давления.

С помощью аналитического решения (8) для полупространства с параметрами $\rho^s = 2700 \text{ кг/м}^3$, $\rho^f = 1000 \text{ кг/м}^3$, $K^s = 10^{10} \text{ Па}$, $K^f = 2.2 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\bar{K} = 2.85 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\mu = 10^{10} \text{ Па}$, $m_0 = 0.05$, $\sigma = 10^{-1} \text{ См/м}$, $\eta = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $k = 10^{-9} \text{ м}^2$, $Q = 1 \text{ Кл/м}^2$, $\theta = 1 \text{ м}^{-1}$, $P_0 = 2000 \text{ Н}$ рассчитана компонента E_z напряженности электрического поля во временной области для импульса Берлаге $f(t) = Ft^\gamma e^{-\alpha t} \sin \beta t$ в случае $F = (\alpha^2 + \beta^2)/\beta$, $\gamma = 0$, $\alpha = 1000 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 1000 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 изображена электрограмма компоненты E_z для различных расположений приемника по глубине. Линия В-В – годограф «вмороженной» волны. Эта волна возбуждается в момент прихода плоской упругой волны в точку приемника. Линия М-М – годограф «медленной» волны, скорость которой значительно меньше «вмороженной», т.е. скорости продольной упругой волны.

Рис. 2. Электрограмма при возбуждении плоских продольных упругих волн во влагонасыщенном полупространстве

Нетрудно показать, что при возбуждении плоских продольных упругих волн электрическое поле возбуждается только во влагонасыщенном слое, следовательно, при наличии первого «сухого» слоя регистрация сейсмoeлектрического эффекта на дневной

поверхности в горизонтально-слоистых средах невозможна. Следует здесь заметить, что при возбуждении в среде с первым «сухим» слоем плоских поперечных упругих волн регистрация на дневной поверхности электромагнитных полей сейсмoeлектрического эффекта возможна [7].

3. Электромагнитное поле сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн в трехслойной среде с латерально-неоднородным влагонасыщенным вторым слоем

Для изучения влияния латерального изменения параметров влагонасыщенного слоя на электромагнитное поле сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских упругих волн рассмотрим трехслойную модель среды показанную на рис. 3. Пусть все три слоя имеют одинаковые упругие и электромагнитные свойства, т.е.

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho,$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = K,$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu,$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma,$$

где ρ_i , K_i , μ_i , σ_i – плотность, модуль всестороннего сжатия, модуль сдвига и электропроводность i -го слоя ($i = 1, 2, 3$), но электрокинетические параметры влагонасыщенного слоя меняются вдоль оси Ox по закону

$$k_{\text{э}} = \begin{cases} k_{\text{э}1}, & x < 0, \\ k_{\text{э}2}, & x \geq 0, \end{cases} \quad (9)$$

то есть либо поверхностная плотность адсорбированного заряда, либо удельная поверхность пор меняются скачком по латерали.

Рис. 3. Трехслойная среда с латерально-неоднородным влагонасыщенным вторым слоем

Рассмотрим в такой среде возбуждение плоских продольных упругих волн нормально к дневной поверхности. Вектор смещения упругого поля будет в этом случае иметь только вертикальную компоненту u_z^s определяемую выражением (7), а электромагнитное поле – компоненты E_x , E_z и H_y :

$$\begin{aligned} H_y(x, z) &= -\sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{sh } \xi z}{\xi} \varphi_i(\xi) \cos k_x x dk_x, \\ E_x(x, z) &= \sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\pi \sigma} \int_0^\infty \text{ch } \xi z \varphi_i(\xi) \cos k_x x dk_x, \\ E_z(x, z) &= \sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\pi \sigma} \int_0^\infty \frac{k_x \text{sh } \xi z}{\xi} \varphi_i(\xi) \sin k_x x dk_x, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\xi^2 = k_x^2 - k_e^2$, $\text{Re } \xi > 0$; $k_e = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$, $\text{Im } k_e > 0$;

$$\begin{aligned} \varphi_1(\xi) &= e^{(i\chi-\xi)h_1} (e^{(i\chi-\xi)h_2} - 1), \\ \varphi_2(\xi) &= e^{-(i\chi+\xi)h_1} (e^{-(i\chi+\xi)h_2} - 1), \\ \varphi_3(\xi) &= e^{(ik_p-\xi)h_1} (e^{(ik_p-\xi)h_2} - 1); \end{aligned}$$

$$\alpha_i = (k_{\varphi 2} - k_{\varphi 1})B_i / a, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$B_1 = \frac{B}{2 \sin \chi h_2} e^{i(k_p - \chi)h_1} \cdot (e^{ik_p h_2} - e^{-i\chi h_2}), \quad B_2 = \frac{-B}{2 \sin \chi h_2} e^{i(k_p + \chi)h_1} \cdot (e^{ik_p h_2} - e^{i\chi h_2}),$$

$$B_3 = \frac{i\omega A k_p^2 u_p^0}{\chi^2 - k_p^2} - \omega^2 \rho^f u_p^0,$$

$$B = -\omega u_p^0 \left(\frac{\eta m_0}{k} + \frac{A k_p^2}{\chi^2 - k_p^2} \right).$$

Если в выражениях (10) положить $k_{\varphi 1} = k_{\varphi 2} = k_\varphi$, то, в соответствии с вышеизложенными результатами, электромагнитное поле в области ($0 \leq z < h_1$) равно нулю. Из решения (10) видно также, что на дневной поверхности отлична от нуля только тангенциальная компонента напряженности электрического поля E_x . Кроме того, как следует из (10), в случае распространения плоской продольной упругой волны в среде с первым «сухим» слоем электромагнитное поле сейсмоэлектрического эффекта регистрируется на дневной поверхности только при латеральном изменении параметров среды и представлено

«быстрыми» волнами, т.е. электромагнитными волнами, регистрируемыми в приемнике в момент прихода упругой волны к кровле влагонасыщенного слоя [10, 11].

4. Зависимость сейсмoeлектрического эффекта второго рода от петрофизических параметров влагонасыщенного пласта

Для изучения зависимости сейсмoeлектрического эффекта второго рода от петрофизических параметров горных пород проведены расчеты компонент упругого и электромагнитного полей сейсмoeлектрического эффекта при гармоническом возбуждении продольных упругих волн плоским источником во влагонасыщенном полупространстве и в трехслойной среде с латерально-неоднородным влагонасыщенным вторым слоем. В расчетах использовались аналитические решения (7), (8), (10).

На рис. 4а показана зависимость от проницаемости отношения амплитуд электрического и упругого полей в гармоническом режиме: кривые 1, 2, рассчитаны, соответственно для частот 10, 100 Гц при $z = 0$ и кривые 3, 4, рассчитаны, соответственно для частот 10, 100 Гц при $z = 1$ м. При расчетах учитывалось, что при увеличении проницаемости соответственно уменьшается удельная поверхность пор. Зависимость проницаемости от удельной поверхности пор полагали согласно [12] $k = C/\theta^2$, где коэффициент выбирался $C = 1$. Из рис. 4а видно, что при измерении полей на дневной поверхности (кривые 1, 2) сейсмoeлектрический эффект растет с уменьшением проницаемости. При измерении полей в среде (кривые 3, 4) сейсмoeлектрический эффект второго рода максимален для некоторой полосы значений проницаемости и спадает при уменьшении или увеличении k . Отметим, что данные результаты расчетов (рис. 4а) хорошо подтверждают результаты лабораторных исследований сейсмoeлектрического эффекта [13].

Рис. 4. Зависимость от проницаемости отношения модулей компонент электрического и упругого полей при возбуждении плоских продольных упругих волн во влагонасыщенном полупространстве (а) и в среде с латеральной неоднородностью (б)

При распространении продольных упругих волн в латерально-неоднородной среде (рис. 3) наблюдается (рис. 4б) высокая чувствительность эффекта к изменению проницаемости среды (кривые 1,2,3 рассчитаны, соответственно для частот 20, 100, 200 Гц).

Полученные результаты могут быть использованы в соответствии с подходом, предложенным в работе [14], состоящим в измерении аномалий сейсмoeлектрического эффекта в частотном режиме при проведении профилирования и объяснении их изменением петрофизических свойств среды. Так, увеличение амплитуды сейсмoeлектрического эффекта второго рода по профилю при возбуждении продольных упругих волн можно объяснить уменьшением проницаемости влагонасыщенной среды.

На рис. 5 показана зависимость от координаты x отношения амплитуд электрического и упругого полей в гармоническом режиме при возбуждении продольных упругих волн в среде с латеральной неоднородностью: кривые 1, 2, 3 рассчитаны, соответственно для частот 40, 60, 80 Гц. Параметры среды взяты такие же, как в расчетах для полупространства, но адсорбированный заряд $Q = 1 \text{ Кл/м}^2$ при $x < 0$ и $Q = 0.1 \text{ Кл/м}^2$ при $x \geq 0$. Как видно из рис. 5, сейсмoeлектрический эффект максимален в окрестности $x = 0$, то есть в области разрыва Q и с удалением от этой области стремится к нулю.

Рис. 5. Зависимость отношения модулей компонент электрического и упругого полей от координаты x при возбуждении плоских продольных упругих волн в среде с латеральной неоднородностью

На основании полученных результатов можно рекомендовать использовать регистрацию сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн для локализации областей резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенного пласта, в частности, для нахождения его вертикальных границ.

Выводы

1. Для низкочастотного приближения задачи о сейсмoeлектрическом эффекте второго рода получены аналитические решения для трехслойной среды с латерально-неоднородным влагонасыщенным слоем при возбуждении плоских продольных упругих волн.

2. Из аналитических решений следует, что плоские продольные упругие волны в горизонтально-слоистой среде возбуждают электрическое поле только в пределах влагонасыщенного слоя, и если первый слой не содержит влаги, то сейсмoeлектрический эффект на дневной поверхности и в первом слое наблюдаться не будет. Если параметры влагонасыщенного слоя изменяются по латерали, то в первом слое и на дневной поверхности будет возбуждаться электромагнитное поле.

3. На основании полученных результатов рекомендуется использовать регистрацию сейсмoeлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн для нахождения области резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенного пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, А.Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР. 1939, 24, № 1. - С. 41 – 43.
2. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР, сер. Геогр. и геофиз., 1944, т. 8, № 4. - С. 134 – 149.
3. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids // J. Acoustic. Soc. Amer., 1956, V. 28. P. 168 – 186.
4. Pride S.R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Review. B., 1994, V. 50, P. 15678 – 15696.
5. Haartsen M.W. Electrostatic waves from point sources in layered media / M.W. Haartsen, S.R. Pride // J. Geophysical Res., 1996, V. 102, P. 24745 – 24769.
6. Светов, Б.С. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. I. Постановка задачи / Б.С. Светов, В.П. Губатенко // Физика Земли. 1999, № 10. - С. 67 – 73.
7. Губатенко, В.П. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. II. Расчеты в горизонтально-слоистых средах / В.П. Губатенко, Б.С. Светов, И.Г. Московский // Физика Земли. 2002, № 2. - С. 34 – 50.
8. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. – М. : Недра, 1986. – 261 с.
9. Николаевский, В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. – М. : Недра, 1996. – 447 с.
10. Московский, И.Г. Типы электромагнитных волн, порождаемых сейсмoeлектрическим эффектом второго рода / И.Г. Московский, В.П. Губатенко, Б.С. Светов // РГЖ, 2002, Вып. 25-26. - С. 4 – 7.
11. Московский, И.Г. Кинематика электромагнитных волн сейсмoeлектрического эффекта второго рода в двухслойной среде / И.Г. Московский, Г.А. Московский // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле, 2009, Т. 9, Вып. 2. - С. 36 – 39.
12. Кобранова, В.Н. Петрофизика. – М. : Недра, 1986. – 392 с.
13. Агеева, О.А. Результаты лабораторных и скважных исследований сейсмoeлектрических явлений в горных породах / О.А. Агеева, Б.С. Светов, С.В. Шипулин, В.С. Лисицын // Тезисы международной конференции «Неклассическая геофизика», Саратов: НВ НИИГГ, 2000. - С. 63 – 64.
14. Светов, Б.С. Экспериментальные полевые исследования сейсмoeлектрического эффекта 2 рода / Б.С. Светов, В.В. Агеев, С.Е. Баландина // Тезисы международной конференции «Неклассическая геофизика», Саратов: НВ НИИГГ, 2000. - С. 49 – 50.

Рецензент: Кокодеева Наталия Евсегнеевна, профессор, доктор технических наук.

Moskowsky Igor Georgievich

Saratov State technical university
Russia, Saratov
E-mail: mosig@mail.ru

Balaban Oleg Michailovich

The Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Russia, Saratov
E-mail: ombal@mail.ru

Fedorova Olga Sergeevna

The Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Russia, Saratov
E-mail: olga.s.fedorova@gmail.com

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university
Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Mathematical modeling of seismoelectric effect of the second sort generated by flat elastic waves in porous moisture saturated environments

Abstract. Within low-frequency model of seismoelectric effect of the second sort analytical decisions for an electromagnetic field of this effect at excitement of flat longitudinal elastic waves in the three-layer environment with a lateral and non-uniform moisture saturated second layer are received. The technique of creation of analytical solutions of seismoelectric effect in low-frequency approach based on the consecutive solution of tasks of the theory of elasticity in the continuous environment, fluid dynamics in the porous moisture saturated permeable environment, electrokinetics and electrodynamics is considered.

The analysis of the received analytical decisions is carried out, is shown that if the first layer doesn't contain moisture in the horizontally layered environment, the seismoelectric effect of the second sort on a day surface and in the first layer is observed only under a condition if parameters of a moisture saturated layer change on lateral. On the basis of the received results recommendations about use of registration of seismoelectric effect of the second sort for localization of areas of sharp changes of petrophysical properties of moisture saturated layers are stated.

Keywords: seismoelectric effect of the second sort; moisture saturated rocks; flat elastic waves; electromagnetic fields; lateral and non-uniform environments; permeability of rocks; analytical decisions.

REFERENCES

1. Ivanov, A.G. Effekt elektrizatsii plastov zemli pri prokhozhdenii cherez nikh uprugikh voln // Dokl. AN SSSR. 1939, 24, № 1. - S. 41 – 43.
2. Frenkel' Ya.I. K teorii seysmicheskikh i seysmoelektricheskikh yavleniy vo vlazhnoy pochve // Izv. AN SSSR, ser. Geogr. i geofiz., 1944, t. 8, № 4. - S. 134 – 149.
3. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids // J. Acoustic. Soc. Amer., 1956, V. 28. P. 168 – 186.
4. Pride S.R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Review. B., 1994, V. 50, P. 15678 – 15696.
5. Haartsen M.W. Electrostatic waves from point sources in layered media / M.W. Haartsen, S.R. Pride // J. Geophysical Res., 1996, V. 102, P. 24745 – 24769.
6. Svetov, B.S. Elektromagnitnoe pole mekhano-elektricheskogo proiskhozhdeniya v poristyykh vlagonasyshchennykh gornyykh porodakh. I. Postanovka zadachi / B.S. Svetov, V.P. Gubatenko // Fizika Zemli. 1999, № 10. - S. 67 – 73.
7. Gubatenko, V.P. Elektromagnitnoe pole mekhano-elektricheskogo proiskhozhdeniya v poristyykh vlagonasyshchennykh gornyykh porodakh. II. Raschety v gorizonta'no-sloistyykh sredakh / V.P. Gubatenko, B.S. Svetov, I.G. Moskovskiy // Fizika Zemli. 2002, № 2. - S. 34 – 50.
8. Uayt Dzh. E. Vozbuzhdenie i rasprostranenie seysmicheskikh voln. – M. : Nedra, 1986. – 261 s.
9. Nikolaevskiy, V.N. Geomekhanika i flyuidodinamika. – M. : Nedra, 1996. – 447 s.
10. Moskovskiy, I.G. Tipy elektromagnitnykh voln, porozhdaemykh seysmoelektricheskimi efektami vtorogo roda / I.G. Moskovskiy, V.P. Gubatenko, B.S. Svetov // RGZh, 2002, Vyp. 25-26. - S. 4 – 7.
11. Moskovskiy, I.G. Kinematika elektromagnitnykh voln seysmoelektricheskogo efekta vtorogo roda v dvukhsloynnoy srede / I.G. Moskovskiy, G.A. Moskovskiy // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle, 2009, T. 9, Vyp. 2. - S. 36 – 39.
12. Kobranova, V.N. Petrofizika. – M. : Nedra, 1986. – 392 s.
13. Ageeva, O.A. Rezul'taty laboratornykh i skvazhnykh issledovaniy seysmoelektricheskikh yavleniy v gornyykh porodakh / O.A. Ageeva, B.S. Svetov, S.V. Shipulin, V.S. Lisitsyn // Tezisy mezhdunarodnoy konferentsii «Neklassicheskaya geofizika», Saratov: NV NIIGG, 2000. - S. 63 – 64.
14. Svetov, B.S. Eksperimental'nye polevye issledovaniya seysmoelektricheskogo efekta 2 roda / B.S. Svetov, V.V. Ageev, S.E. Balandina // Tezisy mezhdunarodnoy konferentsii «Neklassicheskaya geofizika», Saratov: NV NIIGG, 2000. - S. 49 – 50.