

УДК: 550.371:534

DOI: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-69-79

Научная статья

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИСПУЛЬСНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ

Д.А. АЛЕКСЕЕВ^{1,2,3}, М.Б. ГОХБЕРГ²,
А.А. ГОНЧАРОВ^{1,4}, А.О. ПЛИСС¹

¹МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ),

²ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ
ИМ. О.Ю. ШМИДА РАН

³ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ
ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

⁴ГАУ ЯНАО “НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ИЗУЧЕНИЯ
АРКТИКИ”

В настоящей работе приводится общая схема моделирования сейсмоэлектрических (СЭ) полей на основе связанных задач, включающих уравнение движения изотропной упругой среды, уравнения Френкеля для поропругой среды Био, а также уравнения Максвелла для компонент электромагнитного (ЭМ) поля в диффузионном приближении. Выполнен большой объем расчетов динамических двумерных распределений различных характеристик сейсмоэлектрического поля для семейства двухслойных поропругих моделей, возбуждаемых сейсмическим источником и отличающихся рядом геомеханических, фильтрационных и геоэлектрических параметров. Выявлена зависимость наблюдаемых паттернов СЭ-поля от таких параметров как проницаемость среды и тип порового флюида.

Ключевые слова: теория Био, сейсмоэлектрическое поле, сейсмический источник, уравнение Френкеля, пористая флюидонасыщенная среда, поровое давление, сейсмические волны, электрокинетический эффект

ВВЕДЕНИЕ

Изучение сейсмоэлектрических (СЭ) явлений в геофизике началось в первой половине 20 века с работ Р.Р. Томпсона, А.Г. Иванова, Я.И. Френкеля и М. Био [12, 13, 16, 17, 25]. В этих работах СЭ-явления объясняются электрокинетическими (ЭК) процессами, протекающими в пористой флюидонасыщенной среде. В свою очередь, ЭК-процессы описываются в рамках уравнения Гельмгольца-Смолуховского, свя-

Original article

NUMERICAL SIMULATION OF THE SEISMOELECTRIC FIELD GENERATED BY THE IMPULSE SEISMIC SOURCE

D.A. ALEKSEEV^{1,2,3}, M.B. GOKHBERG²,
A.A. GONCHAROV^{1,4}, A.O. PLISS¹

¹MOSCOW INSTITUTE OF PHYSICS AND
TECHNOLOGY

²SCHMIDT INSTITUTE OF PHYSICS OF THE
EARTH, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

³P.P. SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY,
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

⁴SCIENTIFIC CENTER FOR THE STUDY OF THE
ARCTIC

We present a general approach to seismoelectric (SE) field modeling based on coupled multiphysics formulation, including the equation of motion of an isotropic elastic medium, Frenkel's equations for the Biot poroelastic model, and Maxwell's equations for the electromagnetic (EM) field assuming diffusion approximation. Based on this approach, we have simulated an extensive dataset, containing dynamic patterns of SE-signal components for a set of models differing in a number of geomechanical, pore fluid flow and electrical conductivity properties. Simulated SE-field patterns reveal their sensitivity to structure permeability and pore fluid properties.

KEYWORDS: Biot poroelasticity theory, seismoelectric field, seismic source, Frenkel equation, porous fluid-saturated rock, pore pressure, seismic waves, electrokinetic effect

зывающего напряженность электрического поля с градиентом порового давления. Для моделирования и анализа СЭ-полей используются теоретические модели на основе флюидодинамики пористых сред, испытывающих сейсмическое (механическое) воздействие, в частности, модель поропругой среды Био [13].

Несмотря на несколько возросший в последние десятилетия интерес к СЭ-методу [1, 2, 6, 8, 9, 14, 15, 18, 20–24], моделирование и интерпретация СЭ-сигналов остаются сложной проблемой, требующей решения многокомпонентной самосогласованной задачи, сочетающей уравнения флюидодинамики и электро-

магнитного (ЭМ) поля. При этом, аналитическое решение последней было получено в очень ограниченном числе случаев [21], что не позволяет полно оценить информационные возможности СЭ метода. Представляется, что предложенные рядом авторов (С. Прайд, Б.С. Светов и В.П. Губатенко) представления стороннего тока в форме тех или иных частотных зависимостей, включающих градиент давления или разность смещений твердой и жидкой фаз, позволят проводить моделирование СЭ-полей, однако требуют привлечения численных методов для решения фильтрационной задачи. Задача численного анализа распределений порового давления в модели поропругой среды Био и ее обобщениях рассматривалась в большом количестве публикаций, но, как правило, без учета специфики того или иного деформационного процесса, и в отрыве от анализа электромагнитного поля сейсмоэлектрической природы [19].

В результате, на практике соответствующие методы применяются весьма ограниченно, поскольку сталкиваются со сложностью регистрации и интерпретации сейсмоэлектрических полей. В то же время, существует понимание того, что внедрение технологий, основанных на использовании сейсмоэлектрических сигналов, может существенно расширить спектр получаемой информации о строении и параметрах недр, а также их динамическом состоянии [23, 24].

В настоящей работе рассматриваются упрощенные подходы к решению самосогласованной задачи, сочетающей уравнения механики сплошной среды, флюидо- и электродинамики. На основе анализа ее численных решений в относительно простых моделях среды делаются выводы о возможности определения петрофизических свойств по наблюдаемым характеристикам СЭ поля.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЭ-ПОЛЯ

Основой используемого нами подхода к моделированию СЭ-полей является расчет плотности стороннего тока во временной области (электрокинетической природы) по градиенту порового давления, вычисляемому в рамках решения уравнения поропругости [10, 15] с динамически задаваемым распределением объемной деформации. При этом общая схема моделирования сейсмоэлектрических процессов предполагает решение трех связанных друг с другом задач математической физики: уравнения движения изотропной упругой среды (1а), уравнения Френкеля для поропругой среды Био (1б), а также уравнений Максвелла в квазистационарном приближении (1в):

$$\rho_c \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot S = F \quad (1a)$$

$$\frac{1}{K_l} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\beta - 1}{\beta'} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = \frac{1}{\beta' \rho} \nabla^2 p - \frac{\eta}{k_p \rho} \left(\frac{1}{K_l} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\beta}{\beta'} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right) \quad (1б)$$

А.А. АЛЕКСЕЕВ, М.Б. ГОХБЕРГ,
А.А. ГОНЧАРОВ, А.О. ПАЙСС
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ
ИСПУЛЬСНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_{ext} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \end{cases} \quad (1в)$$

Задача (1а) сводится к нахождению поля смещений $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$ в некоторой области кусочно-однородной изотропной упругой среды, описываемой тремя геомеханическими параметрами: модулем объемного сжатия K , модулем сдвига G и плотностью ρ . Для простоты мы ограничимся случаем 2D-модели среды (область моделирования рассматривается в координатной плоскости (x, z)). Величиной S обозначен тензор напряжений, F – объемные силы, принимаемые равными нулю всюду внутри области моделирования, и отличные от нуля только в области действия сейсмоисточника:

$$F = \begin{cases} 0 \text{ вне точки (области) источника} \\ F_s(x_s, z_s, t) \text{ в точке (области) источника} \end{cases} \quad (2)$$

На основании полученного в результате решения (1а) поля смещения $\{u_x, u_z\}$ вычисляется объемная деформация, выполняющая роль входных данных в задаче (1б):

$$\vartheta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3)$$

Задача (1б) представляет собой известное уравнение Френкеля, описывающее неоднородности порового давления $p = p(x, z, t)$, возникающего в пористой флюидонасыщенной среде под действием механических напряжений, и описываемых в терминах объемной деформации $\vartheta(x, z, t)$.

Основными характеристиками среды, входящими в уравнение поропругой модели (1б), являются модуль объемного сжатия сухой пористой породы K , поровой жидкости K_l и среды без пор K_s , плотность ρ и динамическая вязкость поровой жидкости η , а также коэффициент проницаемости k_p . Коэффициенты β и β' определяются по вышеперечисленным параметрам соотношениями

$$\beta = \left(1 - \frac{K}{K_s}\right) \frac{1}{n}, \beta' = 1 + (\beta - 1) \frac{K_l}{K_s} \quad (4)$$

Для оценки величин β и β' можно использовать соотношения $K/K_s \approx 0,5$, $K_l/K_s = 0,1$, откуда $\beta = 5$, $\beta' = 1,4$.

Наконец, в задаче (1в) поля $E(x, z, t)$, $H(x, z, t)$ представляют собой электрическую и магнитную составляющие (напряженности) электромагнитного поля, σ – электропроводность среды, μ – магнитная проницаемость вакуума, j_{ext} – плотность стороннего тока.

Совместное решение задач (1а-в) осуществляется путем подстановки в правую часть (1б) объемной деформации ϑ , получаемой из (1а), а также включения стороннего тока, рассчитываемого в рамках уравнения Гельмгольца-Смолуховского по поровому давлению из (1б):

$$\vec{j}_{ext} = -\sigma c \times grad p(x, z, t), \quad (5)$$

в правую часть первого уравнения Максвелла (1в). Здесь c – потоковый потенциал.

Таким образом, в процессе решения задачи (1а-в) на каждом временном шаге из уравнения (1) находится поле смещений $\vec{u}(x, z, t)$, которое пересчитывается в объемную деформацию $v(x, z, t)$ и оцениваются ее

первая и вторая производные по времени, $\frac{\partial v}{\partial t}, \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$.

Эти оценки подставляются в уравнение (1б), из которого находится распределение порового давления $p(x, z, t)$. Наконец, по градиенту последнего находится плотность стороннего тока, играющего роль источника сейсмоэлектрического поля и принимаемая отличной от нуля в пределах флюидонасыщенных областей разреза, геометрия которых может задаваться произвольным образом.

Схематически последовательное решение геомеханической и электродинамической задач показано на рис. 1.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭ-ПОЛЕЙ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

Для численного решения задачи применялось ПО COMSOL Multiphysics, реализующее метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование выполнялось во временной области с использованием автоматических адаптивных алгоритмов построения пространственной и временной сетки. При этом использовались мо-

дули Solid Mechanics для задачи (1а), Coefficient Form PDE для задачи (1б) и Magnetic Field Formulation для задачи (1в). Важный элемент работы был связан с выделением зон скин-эффекта и изменения параметров (увеличения детальности) сетки в их пределах. Оптимальные параметры конечно-элементных сеток определялись с использованием оценок характерных пространственных скоростей изменения моделируемых величин вблизи границ сред с различными параметрами, полученных на основе аналитических представлений, приводимых в [1–6].

Был выполнен большой объем расчетов динамических двумерных распределений различных характеристик сейсмоэлектрического поля для семейства двухслойных пороупругих моделей, возбуждаемых сейсмическим источником и отличающихся рядом геомеханических, фильтрационных и геоэлектрических параметров. Значения параметров среды выбирались в соответствии с типовыми характеристиками горных пород-осадочных коллекторов: модуль Юнга $E=20$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0.2$, плотность $\rho=2700$ кг/м³, пористость $n=15\%$ [7], проницаемость $10^{-10}/10^{-12}/10^{-14}/10^{-16}$ м²; рассматривалось два типа флюида: с вязкостью $\eta=10^{-2}$ Па·с и объемным модулем $K_f=1.5$ (нефть), а также $\eta=0.89 \times 10^{-3}$ Па·с и $K_f=2.1$ ГПа (вода) [11]. С целью корректного расчета красовой задачи для уравнений Максвелла в модель дополнительно включается третий слой – воздух, не участвующий в моделировании механической части задачи. Рассматривалось несколько вариантов геоэлектрического строения разреза, при котором удельное электрическое сопротивление (УЭС) каждого из

$$\rho_c \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot S = \vec{F} \quad \longrightarrow \quad \vec{u} = \vec{u}(x, z, t) \quad \longrightarrow \quad v = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)$$

Уравнения движения

Поле смещений

Объемная деформация

$$\frac{1}{K_f} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\beta-1}{\beta'} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{1}{\beta' \rho} \nabla^2 p - \frac{\eta}{k_p \rho} \left(\frac{1}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\beta}{\beta'} \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad \longrightarrow \quad p = p(x, z, t) \quad \longrightarrow$$

Уравнение Френкеля

Поровое давление

$$\vec{j}_{ext} = -\sigma c \cdot grad p(x, z, t)$$

Уравнение Гельмгольца-Смолуховского

$$\begin{cases} rot \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_{ext} \\ rot \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \vec{E}(x, z, t)$$

Уравнения Максвелла

Электрическая компонента ЭМ поля

ρ_c - плотность среды (2700 кг/м ³)
S - тензор напряжений
F - сила (источник)
$\beta = 5, \beta' = 1.4$
j_{ext} - плотность стороннего тока
μ - магнитная проницаемость вакуума

РИС. 1.

Схема последовательности решения задач при моделировании сейсмоэлектрических полей

слоев принимало значение $1000/100/10/1$ Ом \times м (во всех сочетаниях), УЭС воздуха составляет 10^7 Ом \cdot м. Мощность верхнего слоя среды принималась равной 500 и 1000 м. Значение потокового потенциала принято равным 5×10^{-6} В/Па.

Расчетные модели представляют собой набор значений вышеуказанных параметров (в различных комбинациях), отнесенных к областям конечно-элементной 2-D сетки, используемой для моделирования полей электрокинетической природы в ПО COMSOL Multiphysics. Дополнительная детализация сеток внутри т.н. граничных слоев, характеризующихся проявлением скин-эффекта поля порового давления, позволила повысить точность расчета СЭ-сигнала и обнаружить его реакцию на изменение проницаемости среды.

В результате проведенного моделирования получен массив динамических распределений параметров напряженно-деформированного состояния порупругой среды, а также компонент электромагнитного поля для вышеописанного набора моделей, возбуждаемых сейсмическим воздействием (импульсным источником) силой 1000 кН. Паттерны различных составляющих СЭ-сигнала для отдельных моментов времени выборочно приводятся на рис. 2–7.

На основании полученных синтетических данных показано, что при использовании сейсмического ис-

точника (1000 кН) величина аномалии электрического поля при глубине залегания коллектора 500 м достигает 0.5 мкВ/м, а при 1000 м составляет около 0.1 мкВ/м. Максимальный уровень сигнала отмечается в момент достижения фронтом сейсмической волны поверхности коллектора. С ростом сопротивления верхнего слоя амплитуда аномалии несколько возрастает. Выявлена характерная пространственная форма интенсивности сейсмоэлектрического сигнала при одновременной регистрации вдоль профиля с симметрией относительно точки расположения сейсмоисточника; указанное свойство может быть использовано для выделения искомого сигнала на фоне шумов и повышения достоверности его регистрации.

Важнейшим результатом является выявленная зависимость не только толщины скин-слоя, но и амплитуды электрического поля от проницаемости среды (рис. 5), если наблюдения выполняются в непосредственной близости от данного слоя (слой выходит на поверхность, либо измерения ведутся в скважине). Однако при попытках наблюдать СЭ-эффект, обусловленный влиянием глубоко залегающего слоя с поверхности, основная сложность связана с низким уровнем сигнала (порядка десятых долей мкВ/м при глубине залегания коллектора 500 м). Кроме того, при глубинах СЭ-генерирующего слоя свыше 100–200 м

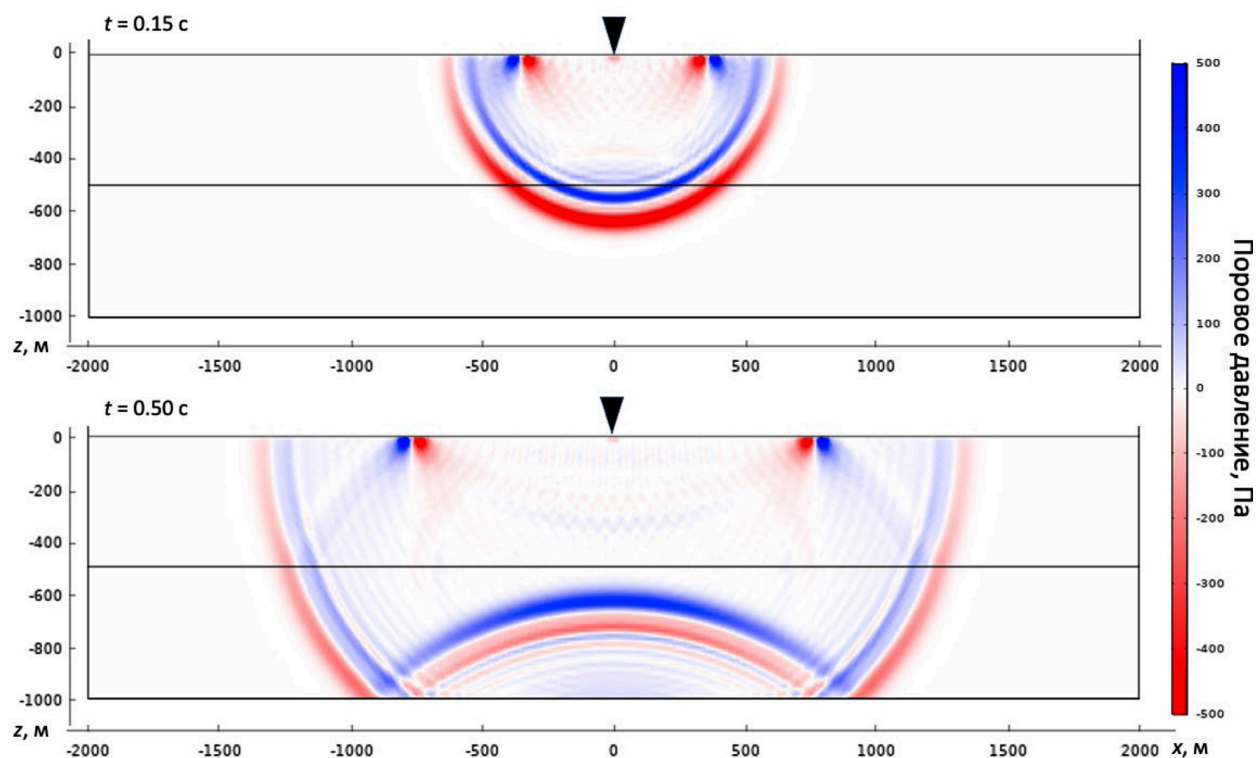


РИС. 2.

Распределения поля порового давления, соответствующего распространению сейсмической волны в двухслойной флюидонасыщенной среде, возбуждаемой импульсным механическим воздействием (силой 1000 кН, действующей в вертикальном направлении в точке с координатами $x=0$, $z=0$) для двух моментов времени: 0.15 с (вверху) и 0.5 с (внизу)

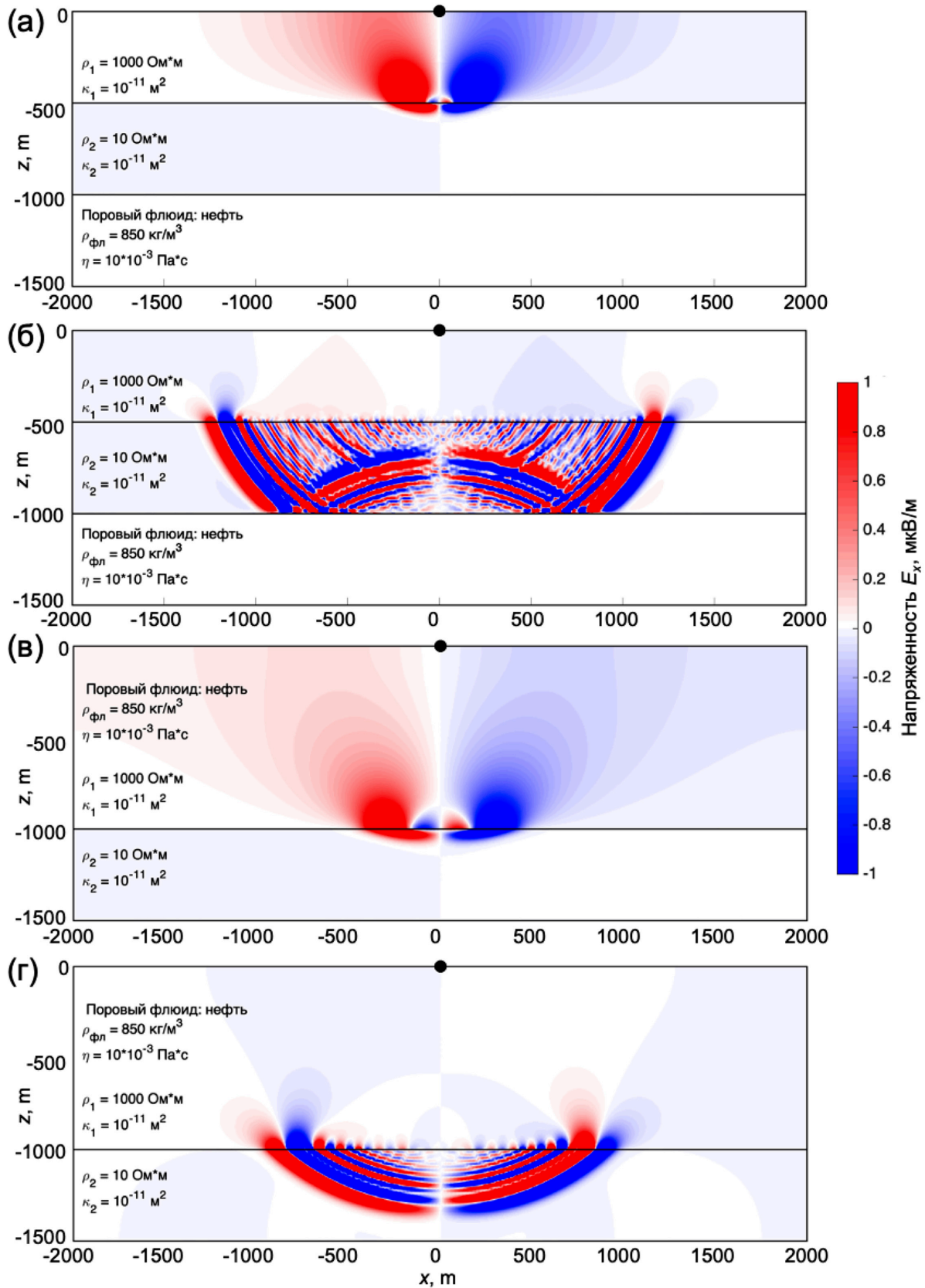


Рис. 3.

Распределения компоненты E_x в моделях с различной глубиной залегания СЭ-генерирующего коллектора: $H_1=500$ м (а, б) и $H_1=1000$ м (в, г) для моментов времени $t=0.21$ с (максимальная интенсивность СЭ-сигнала, t_{max}) (а, в) и $t=0.5$ с (б, г)

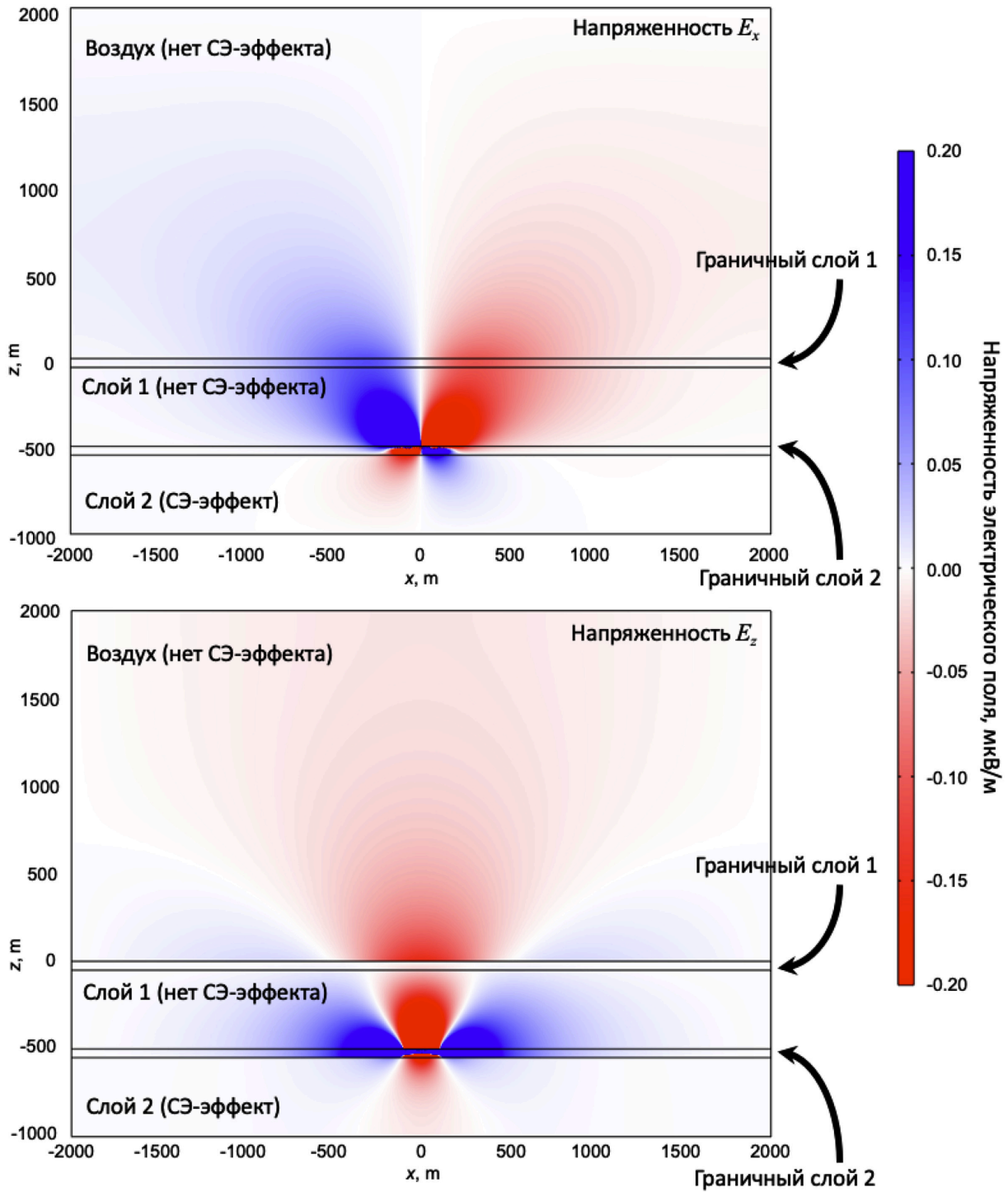


Рис. 4.

Распределения компонент E_x (вверху) и E_z (внизу) в разрезе модели для момента времени $t=180$ мс. Флюидонасыщенным (СЭ-генерирующим) является только нижний слой (слой 2)

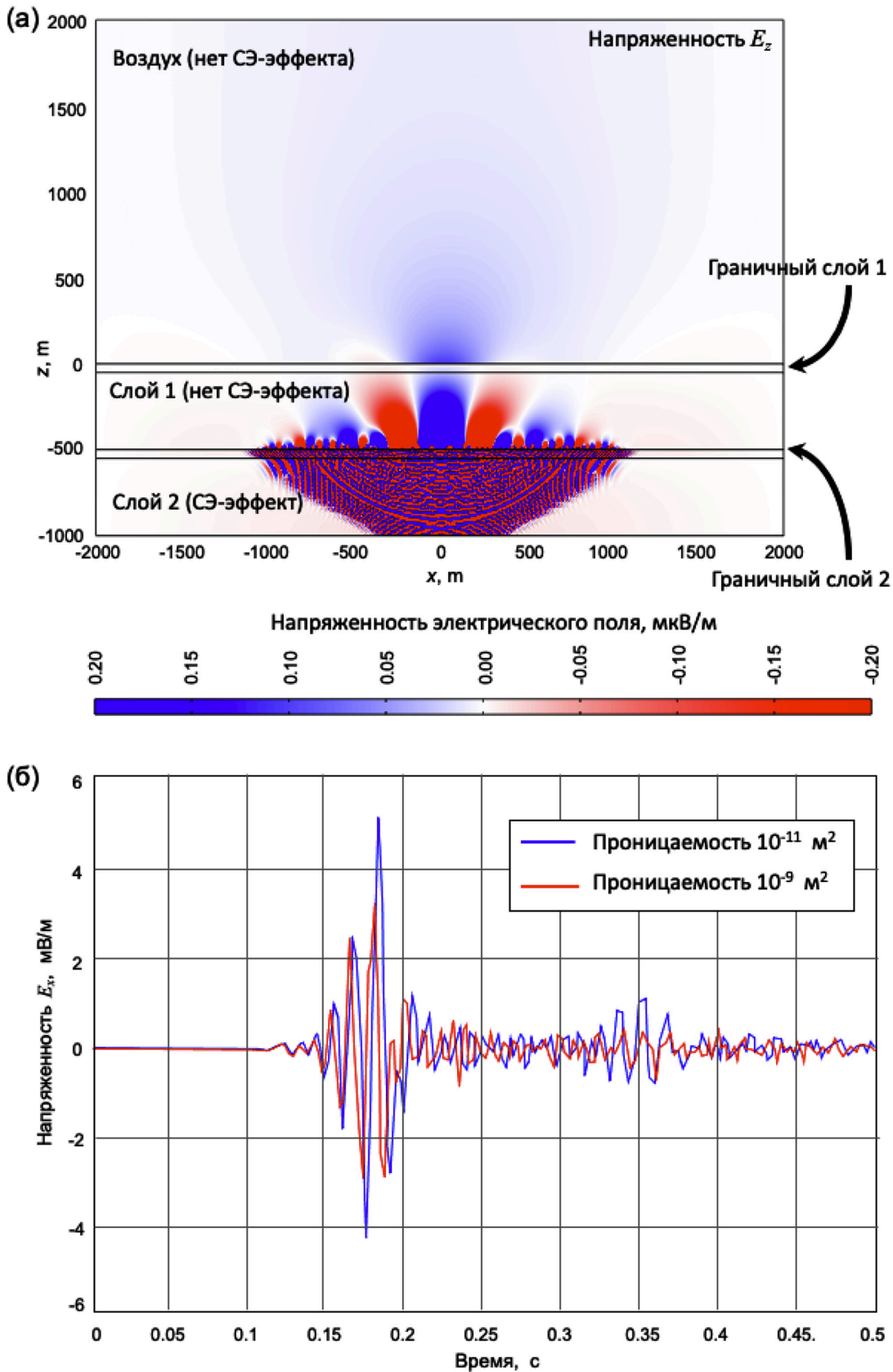


РИС. 5.

(а) Распределение компоненты E_z в разрезе модели с генерацией СЭ-поля в нижнем слое для момента времени $t=250$ мс; (б) Временные зависимости сигнала для компоненты E_x в точке $x=100$ м при различных значениях проницаемости верхнего слоя

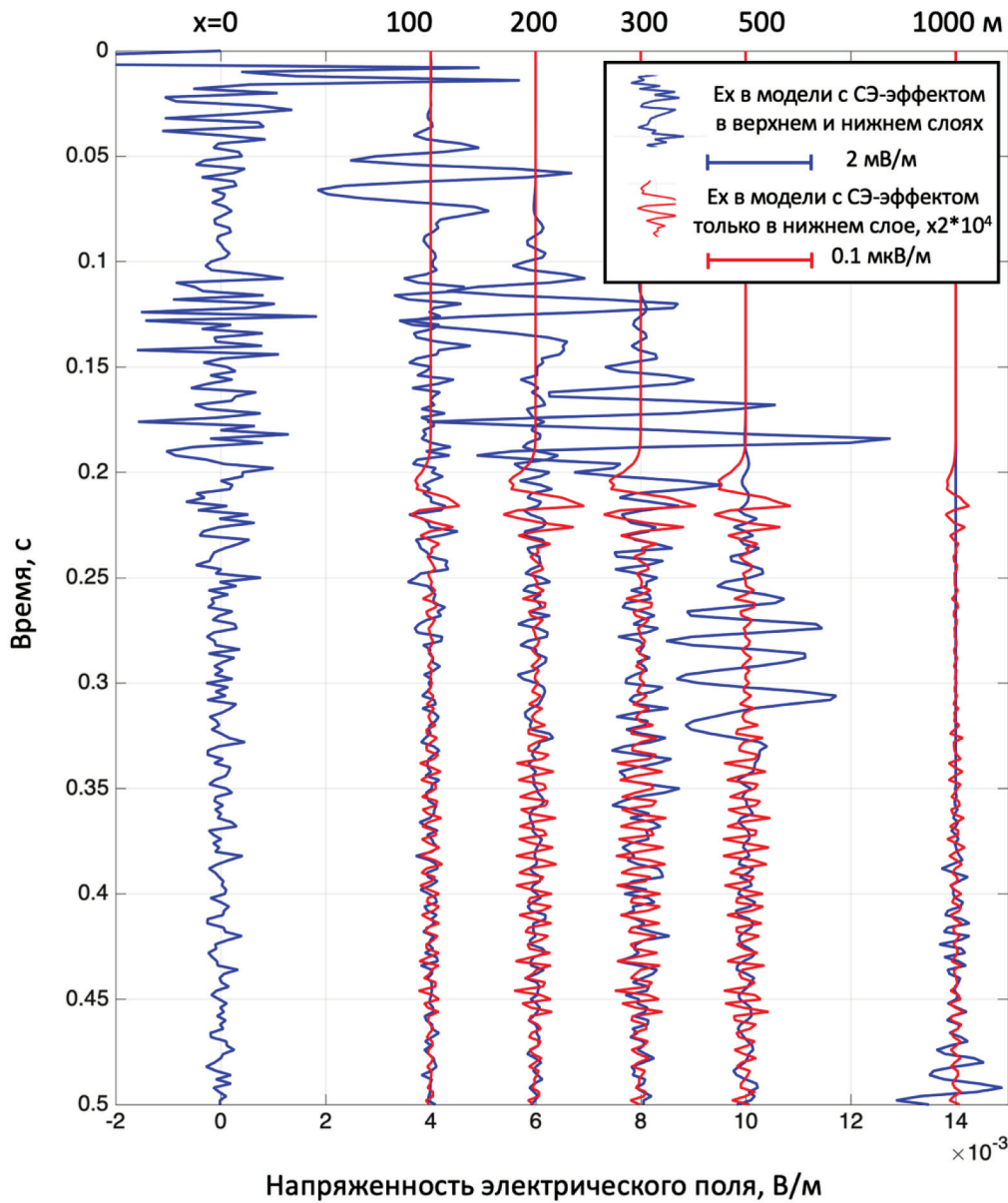


Рис. 6.

Временные зависимости горизонтальной составляющей напряженности электрического поля E_x на поверхности среды для набора пунктов, находящихся на различном удалении от сейсмоисточника, рассчитанные для двухслойных моделей с сейсμοэлектрическим эффектом только в нижнем слое (красные кривые), а также одновременно в верхнем и нижнем слоях (синие кривые). Проницаемость нижнего слоя составляет 10^{-10} м^2 , верхнего – 10^{-16} м^2 .

отмечается весьма слабое различие СЭ-сигнала даже при значительном изменении его проницаемости (рис. 7).

Проведенное моделирование указывает на возможность инструментальной регистрации электрических сигналов, возникающих при искусственном сейсмическом воздействии на флюидонасыщенный коллектор, залегающий на глубинах до 1 км. Амплитуды наблюдаемых на поверхности земли полей имеют порядок десятых долей мкВ/м, что теоретически допускает их детектирование с применением приемных

диполей длиной в несколько десятков-первые сотни метров. В предварительных результатах моделирования, не учитывающих влияние аномалий порового давления на величину объемной деформации среды, и возможных быстрых изменений по типу скин-эффекта, отмечается слабая зависимость полученных полей от коэффициента проницаемости среды (в пределах рассмотренного диапазона), и несколько более выраженная зависимость от типа порового флюида. Последняя, в основном, определяется величиной модуля всестороннего сжатия жидкости (рис. 7).

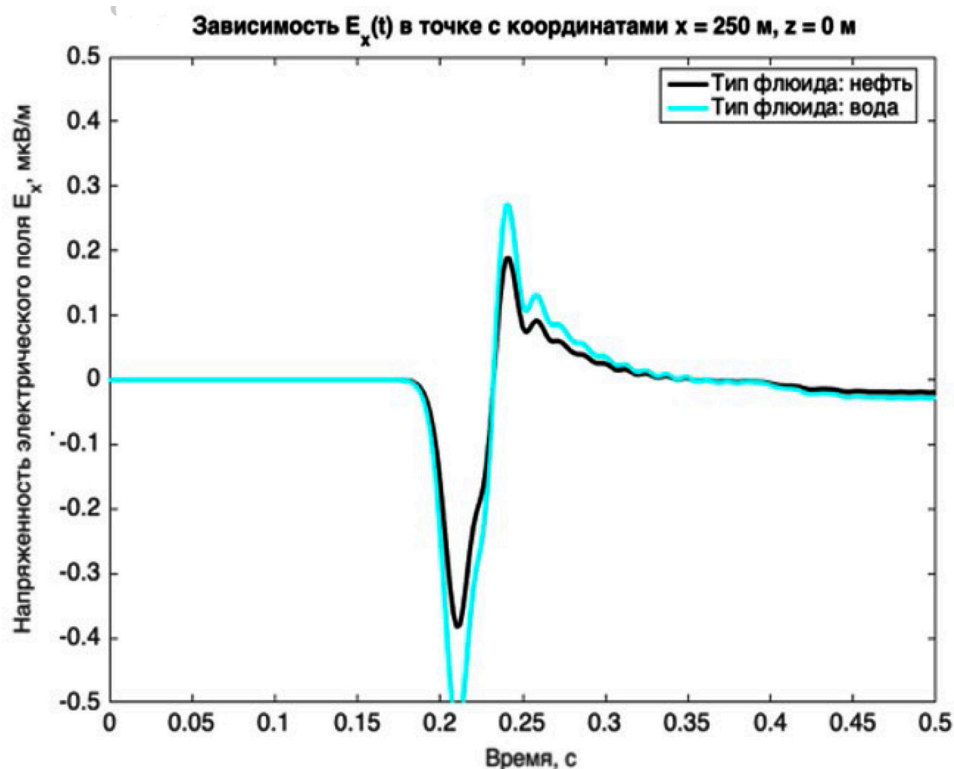


Рис. 7.

Временные зависимости E_x в точке ($x=250$ м, $z=0$ м) для моделей с различным типом флюида (нефть/вода) в СЭ-генерирующем слое

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена общая схема моделирования сейсмоэлектрических (СЭ) полей на основе связанных задач, включающих уравнение движения изотропной упругой среды, уравнения Френкеля для пороупругой среды Био, а также уравнения Максвелла для компонент электромагнитного (ЭМ) поля в диффузионном приближении. Связь данных задач математической физики между собой осуществляется путем подстановки в правую часть уравнения Френкеля объемной деформации, оцениваемой по динамическим полям смещений из уравнения движения сплошной среды, и последующего включения стороннего тока, рассчитываемого по градиенту порового давления (уравнение Гельмгольца-Смолуховского), в правую часть первого уравнения Максвелла. С использованием оценок характерного пространственного масштаба вариаций СЭ-поля в граничных областях (скин-слой) сред с различающимися параметрами, проведена адаптация численных методов расчета СЭ-сигнала для моделирования полей, возбуждаемых сейсмическими волнами в 1D/2D-моделях среды, основанная на применении ПО конечно-элементного моделирования.

С использованием вышеописанного подхода выполнено моделирование двумерных динамических распределений различных характеристик сейсмоэлектри-

ческого поля для семейства двухслойных пороупругих моделей, возбуждаемых сейсмическим источником и отличающихся рядом геомеханических, фильтрационных и геоэлектрических параметров. Анализ полученных массивов данных позволяет продемонстрировать возможность генерации СЭ-полей детектируемого уровня и обнаружить выраженную чувствительность напряженности электрического поля к изменению проницаемости флюидонасыщенного коллектора при условии наблюдений на его поверхности. В то же время, при значительной глубине залегания коллектора (свыше нескольких сотен метров) отмечается существенное снижение данной чувствительности. Важным результатом является обнаруженная зависимость наблюдаемых паттернов СЭ-поля от типа порового флюида.

Таким образом, на основе анализа полученных численных решений в относительно простых моделях среды выявлены некоторые закономерности поведения СЭ-поля и сделана попытка оценить возможности использования того или иного вида СЭ-сигнала для определения петрофизических свойств среды. Установлена принципиальная возможность регистрации СЭ-сигналов, связанных с наличием границ флюидонасыщенных коллекторов. Полученные данные свидетельствуют о различиях в наблюдаемом СЭ-сигнале

в зависимости от ряда параметров среды, включая ее коллекторские свойства и тип флюида.

На основании рассмотренной теоретической модели и соответствующего инструментария для решения прямых и обратных задач, может быть предложен метод оценки ряда геомеханических и петрофизических (фильтрационных) параметров, основанный на измерении СЭ-поля, генерируемого в пороупругой среде с применением сейсмического источника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00691).

ЛИТЕРАТУРА

1. **АЛЕКСЕЕВ Д.А., ГОХБЕРГ М.Б.** О возможности оценки свойств земной коры по наблюдениям электрического поля электрокинетической природы, генерируемого приливными деформациями в зоне разрывного нарушения // *Физика Земли*. 2018. № 3. С. 106–122.
2. **АЛЕКСЕЕВ Д.А., ГОХБЕРГ М.Б.** Электрическое поле приливного происхождения в многослойной среде и возможности его использования для оценки упругих свойств и проницаемости формаций // *Физика Земли*. 2019. № 2. С. 168–180.
3. **ГАРАГАШ И.А., ГОХБЕРГ М.Б., КОЛОСНИЦЫН Н.И.** Мониторинг деформационных процессов посредством наблюдения вертикальной компоненты электрического поля // *Очерки геофизических исследований. К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 250–256.*
4. **ГОХБЕРГ М.Б., КОЛОСНИЦЫН Н.И., НИКОЛАЕВ А.И.** Приливные деформации и электрокинетический эффект в двухслойной поронасыщенной среде // *Физика Земли*. 2007. № 8. С. 85–89.
5. **ГОХБЕРГ М.Б., КОЛОСНИЦЫН Н.И., ЛАПШИН В.М.** Электрокинетический эффект в приповерхностных слоях Земли // *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 13–19.
6. **ГОХБЕРГ М.Б., КОЛОСНИЦЫН Н.И., ПЛИСС А.О., АЛЕКСЕЕВ Д.А.** Сейсмоэлектрический эффект, связанный с распространением волны Рэлея // *Физика Земли*. 2022. № 2. С. 128–135.
7. **КОБРАНОВА В.Н.** Физические свойства горных пород (петрофизика). М.: Гостоптехиздат, 1962. 490 с.
8. **ПОТАПОВ О.А., ЛИЗУН С.А., КОНДРАТ В.Ф. и др.** Основы сейсмоэлектроразведки. М.: Недра, 1995. 267 с.
9. **СВЕТОВ Б.С.** Основы геоэлектрики М.: АКИ, 2008. 656 с.
10. **СУРКОВ В.В.** Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: МИФИ, 2000. 448 с.
11. **Физические величины. Справочник / Ред. Григорьев**

Д.А. АЛЕКСЕЕВ, М.Б. ГОХБЕРГ,
А.А. ГОНЧАРОВ, А.О. ПЛИСС
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ
ИСПУЛЬСНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ

- И.С., Мейлихов Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
12. **ФРЕНКЕЛЬ Я.И.** К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // *Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз.* 1944. С. 134–157.
 13. **BIOT M.** General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material // *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. 1956. V. 78. P. 91–96.
 14. **GARAGASH I.A., GOKHBERG M.B., KOLOS-NITSYN N.I.** Monitoring of deformation process by means of electric field observation // *Mud Volcanoes. Geodynamics and Seismicity / G. Martinelli and B. Panahi (eds.). Springer, 2005. P. 171–179.*
 15. **GERSHENSON N., VAMBAKIDIS G.** Modeling of seismo-electromagnetic phenomena // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2001. V. 3, N 4. P. 247–275.
 16. **IVANOV A.G.** Effect of electrization of earth layers by elastic waves passing through them // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1939. V. 24. P. 42–45. (In Russian).
 17. **IVANOV A.G.** Seismoelectric effect of the second kind // *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Ser. Geogr. Geophys.* 1940. N 5. P. 600–727. (In Russian).
 18. **JOUNIAUX L., ZYSERMAN F.** A review on electrokinetically induced seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for Earth sciences // *Solid Earth*. 2016. V. 7. P. 249–284.
 19. **NAUMOVICH A.** Efficient numerical methods for the Biot poroelasticity system in multilayered domains. PhD Thesis. Keiserslautern University. 2007.
 20. **POTYLITSYN V., KUDINOV, D., ALEKSEEV D., КОК-НОНKOVA E., KURKOV S., EGOROV I., PЛИСС А.** Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors // *Sensors*. 2021. V. 21. 2301.
 21. **PRIDE S.R.** Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // *Phys. Rev.* 1994. B 50. P. 15678–15696.
 22. **REVIL A., JARDANI A.** Seismoelectric response of heavy oil reservoirs: theory and numerical modelling // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 180. P. 781–797.
 23. **REVIL A., JARDANI A., SAVA P., HAAS A.** The Seismoelectric Method: Theory and applications. Wiley, 2015. 244 p.
 24. **SVETOV B.S.** Self-Consistent Problems of Geoelectrics // *Electromagnetic sounding of the Earth's interior: Theory, Modeling, Practice. Second edition / Ed. Spichak V.V. Elsevier, 2015. P. 79–106.*
 25. **THOMPSON R.R.** The seismic-electric effect // *Geophysics*. 1936. V. 1. N 3. P. 48–51.

REFERENCES

1. **ALEKSEEV D.A., GOKHBERG M.B.** On the possibility of estimation of the Earth crust's properties from the observations of electric field of electrokinetic origin, generated by tidal deformation within the fault zone. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2018. 54:487–503.
2. **ALEKSEEV D.A., GOKHBERG M.B.** Tidal generated

- electric field in the multi-layer structure and the possibilities of its employment for deriving the elastic properties and permeability of the subsurface formations. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019. 55:337–347.
3. **GARAGASH I.A., GOKHBERG M.B., KOLOSITSYN N.I.** Monitoring of deformation process through vertical electric field measurements. *In: Ocherki geofizicheskikh issledovaniy*. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth, 2003:250–256.
 4. **GOKHBERG M.B., KOLOSITSYN N.I., NIKOLAEV A.I.** Tidal deformations and the electrokinetic effect in a two-layer fluid-saturated porous medium. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2007. 43:702–706.
 5. **GOKHBERG M.B., KOLOSITSYN N.I., LAPSHIN V.M.** Electrokinetic effect in the near-surface layers of the Earth. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2009. 45:633–639.
 6. **GOKHBERG M.B., KOLOSITSYN N.I., PLISS A.O., ALEKSEEV D.A.** Seismoelectric effect associated with Rayleigh wave propagation. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2022. 58:128–135.
 7. **KOBRANOVA V.N.** Physical properties of rocks (petrophysics). Moscow: Gostoptechizdat, 1962:1–490. (In Russian).
 8. **POTAPOV O.A., LIZUN S.A., KONDRAT V.F.** Basics of seismoelectrics. Moscow: Nedra, 1995:1–267. (In Russian).
 9. **SVETOV B.S.** Basics of geoelectrics. Moscow: LKI, 2008:1–656. (In Russian).
 10. **SURKOV V.V.** Electromagnetic effects associated with earthquakes and explosions. Moscow: MIFI, 2000:1–448. (In Russian).
 11. Physical quantities. Eds. Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z. Moscow. Energoatomizdat, 1991:1–1232. (In Russian).
 12. **FRENKEL J.** On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in a moist soil. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 1944. 3(4):230–241. (In Russian).
 13. **BIOT M.** General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. *J. Appl. Mech. Trans. ASME*. 1956. 78:91–96.
 14. **GARAGASH I.A., GOKHBERG M.B., KOLOSITSYN N.I.** Monitoring of deformation process by means of electric field observation. *In: Mud Volcanoes. Geodynamics and Seismicity*. G. Martinelli and B. Panahi (eds.). Springer, 2005:171–179.
 15. **GERSHENSON N., BAMBAKIDIS G.** Modeling of seismo-electromagnetic phenomena. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2001. 3(4):247–275.
 16. **IVANOV A.G.** Effect of electrization of earth layers by elastic waves passing through them. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1939. 24:42–45. (In Russian).
 17. **IVANOV A.G.** Seismoelectric effect of the second kind. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 1940. 5:600–727. (In Russian).
 18. **JOUNIAUX L., ZYSERMAN F.** A review on electrokinetically induced seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for Earth sciences. *Solid Earth*, 2016. 7:249–284.
 19. **NAUMOVICH A.** Efficient numerical methods for the Biot poroelasticity system in multilayered domains. PhD Thesis. Keiserslautern university. 2007.
 20. **POTYLITSYN V., KUDINOV, D., ALEKSEEV D., KOKHONKOVA E., KURKOV, S., EGOROV I., PLISS A.** Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*. 2021. 21. 2301.
 21. **PRIDE S.R.** Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Phys. Rev.* 1994 B 50:15678–15696.
 22. **REVIK A., JARDANI A.** Seismoelectric response of heavy oil reservoirs: theory and numerical modelling. *Geophys. J. Int*, 2010. 180:781–797.
 23. **REVIK A., JARDANI A., SAVA P., HAAS A.** The Seismoelectric Method: Theory and applications. Wiley, 2015:1–244.
 24. **SVETOV B.S.** Self-Consistent Problems of Geoelectrics. *In: Electromagnetic sounding of the Earth's interior: Theory, Modeling, Practice*. Second edition. Ed. Spichak V.V. Elsevier, 2015:79–106.
 25. **THOMPSON R.R.** The seismic-electric effect. *Geophysics*. 1936. 1(3):48–51.
-
- Алексеев Дмитрий Александрович**,
 к.ф.-м.н., с.н.с., Московский физико-технический институт
 (национальный исследовательский университет)
 ☎ 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9
 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9
 e-mail: alexeevgeo@gmail.com
- Гохберг Михаил Борисович**,
 д.ф.-м.н., проф., Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
 ☎ 123242, г. Москва, Б. Грузинская ул. д. 10, стр. 1,
 123242, Moscow, B. Gruzinskaya str., 10, p. 1
 e-mail: gmb@ifz.ru
- Гончаров Алексей Алексеевич**,
 м.н.с., ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики»
 ☎ 629008, Тюменская обл., ЯНАО, г. Салехард,
 ул. Республики д. 20,
 629008, Tyumen region, Yamalo-Nenets Autonomous District,
 Salekhard, Republic str., 20,
 e-mail: goncharov.aa@phystech.edu
- Плисс Александра Олеговна**,
 инж., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
 ☎ 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9
 e-mail: pliss.ao@phystech.edu