

ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАЙОНЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ Г-1 В АСЕЙСМИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ И ПРИ ПОДГОТОВКЕ БЛИЗКОГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пантелеев И.А.¹, Полтавцева Е.В.², Гаврилов В.А.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь, pia@icmtt.ru*

²*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Введение

Многолетние комплексные скважинные геофизические измерения, проводимые на территории Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона, позволили установить ряд нетривиальных закономерностей, отражающих влияние слабых электромагнитных излучений (ЭМИ) звукового диапазона частот на характеристики геоакустической эмиссии (ГАЭ) околоскважинного пространства. При этом можно выделить два главных результата этих исследований. Во-первых, это выявление эффекта модулирующего воздействия внешнего ЭМИ звукового диапазона частот на интенсивность ГАЭ. Суть указанного эффекта заключается в коррелированности изменений среднеквадратических значений (СКЗ) ГАЭ с изменениями амплитуды напряженности внешнего переменного электрического поля звукового диапазона частот, воздействующего на геосреду в районе той же скважины [1-3]. В частности, если амплитуда напряженности внешнего электрического поля техногенного или природного происхождения имеет четко выраженные суточные вариации, то СКЗ ГАЭ будут модулироваться с периодом 24 ч. Обнаруженный эффект проявляется уже при уровне напряженности воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м [2]. Во-вторых, было выявлено, что во временных окрестностях достаточно сильных близких землетрясений проявление эффекта модулирующего электромагнитного воздействия на интенсивность ГАЭ усложняется: при практически неизменной амплитуде вариаций воздействующего ЭМИ амплитуда соответствующих вариаций ГАЭ может изменяться весьма быстро и значительно [3,5,8]. В работах [4,5,8] авторами были предложены возможные физические механизмы вышеуказанных эффектов, основанные на анализе взаимодействия фильтрационных и электрических полей в напряженной геосреде. При этом, в том числе было выдвинуто предположение о влиянии на амплитуды ГАЭ (огибающую) во временных окрестностях относительно сильных сейсмических событий электрокинетических процессов, связанных с фильтрацией флюида в контролируемой геофоном зоне. Данное предположение базируется на работах [7,9], в которых появление электрокинетического тока рассматривается в качестве краткосрочного предвестника землетрясения и на работах [12,13], в которых было показано прямое влияние электрических параметров насыщающей породу жидкости на прочность этой породы. Настоящая работа посвящена теоретической проверке этого предположения и направлена на построение математической модели эволюции электрокинетического тока в геосреде при подготовке одиночного сейсмического события. Важной особенностью разрабатываемой модели является максимальный учет имеющихся данных о параметрах и строении геосреды в зоне скважины Г-1.

Математическая постановка задачи.

Задача эволюции геофизических полей в районе скважины имеет два характерных пространственных масштаба: масштаб возмущения напряженно-деформированного состояния, вызванного формированием очага будущего сейсмического события (сотни километров), масштаб возмущения порового давления в районе скважины, вызванного ее работой (сотни метров). Поэтому разрабатываемая математическая модель записывается для двух пространственных масштабов. На первом (более крупном) пространственном масштабе рассматривается задача об изменении объемной деформации в хрупкой упругой геосреде, вызванным эволюцией шаровой неоднородности упругих свойств, являющейся прообразом очага сейсмического события. Моделью второго пространственного масштаба является модель эволюции полей различной природы в районе измерительной скважины, вызванной изменением объемной деформации, вычисленным на первом масштабном уровне. Таким образом, решение, полученное на первом масштабном уровне, является управляющим воздействием для модели второго уровня. В настоящей работе предполагается, что

обратной связи между двумя пространственными масштабами не существует. На рисунке 1 представлены расчетные области для каждого из пространственных масштабов.

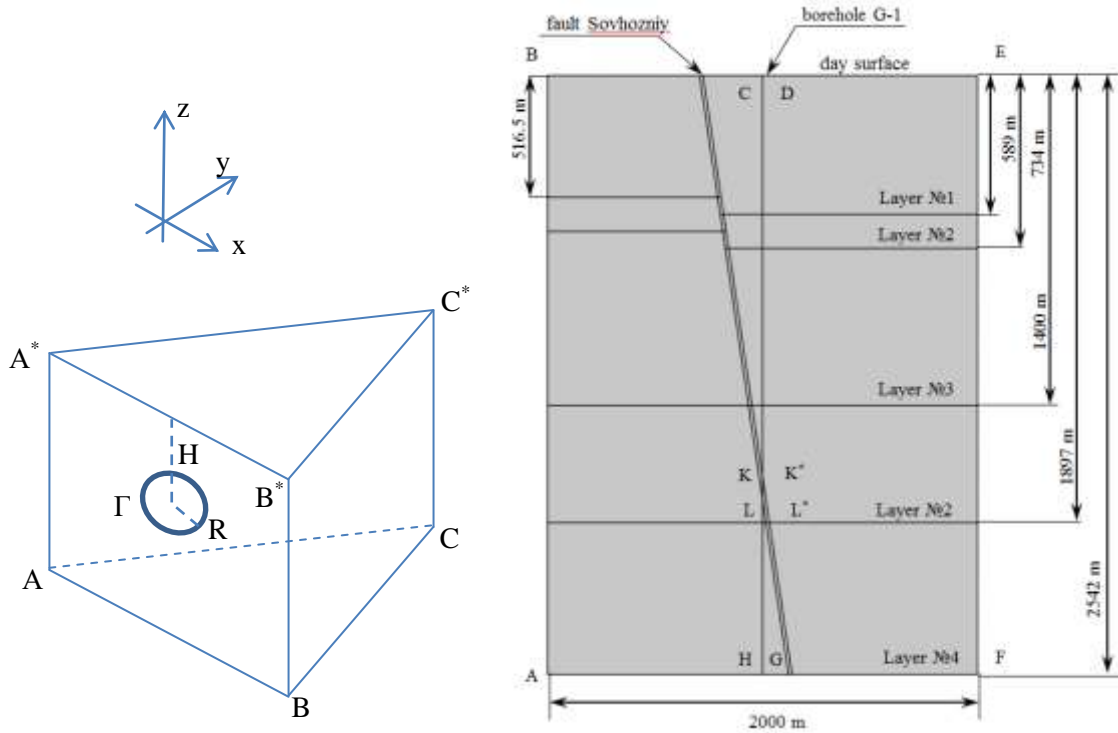


Рис. 1. Расчетные области для первого (слева) и второго (справа) пространственных уровней.

На первом масштабном уровне расчетная область представляет собой квадратную призму с основанием 200x200 км и глубиной 40 км. В центре симметрии этой призмы на глубине H располагается шар радиуса R . Данная призма находится в поле действия сил тяжести и подвергается чистому сдвигу. Задача нахождения возмущения напряженно-деформированного состояния, вызванного наличием шаровой неоднородности модуля сдвига, имеет вид (1). На втором масштабном уровне задача эволюции геофизических полей рассматривается в плоском случае. Расчетная область состоит из четырех слоев, скважины Г-1 и разлома Совхозный, пересекающего скважину в интервале глубин 1600-1700 метров. Физические свойства пород в каждом из слоев определены в лабораторных исследованиях керна. По данным гидродинамического опробования скважины установлен дебит скважины, равный 0.3 л/с.

$$\begin{cases}
 \bar{\nabla} \cdot \bar{\sigma} + \rho \bar{g} = 0 \\
 \bar{\sigma} = \lambda I_1(\bar{\varepsilon}) \bar{E} + 2\mu \bar{\varepsilon}, \quad \bar{u}|_{t=0} = 0, \\
 \bar{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\bar{\nabla} \bar{u} + \bar{\nabla} \bar{u}^T)
 \end{cases}
 \begin{cases}
 \bar{u}|_{ABC} = 0; u_x|_{AA^*B^*B} = 0; \bar{u}|_{\Gamma^+} = \bar{u}|_{\Gamma^-} \\
 \bar{\sigma}|_{A^*B^*C^*} = 0; (\bar{\sigma} \cdot \bar{n})_x|_{AA^*C^*C} = -\frac{(200 \cdot 10^6)}{\sqrt{2}}; \\
 (\bar{\sigma} \cdot \bar{n})_y|_{AA^*C^*C} = \frac{(200 \cdot 10^6)}{\sqrt{2}}; (\bar{\sigma} \cdot \bar{n})_x|_{BB^*C^*C} = -\frac{(200 \cdot 10^6)}{\sqrt{2}}; \\
 (\bar{\sigma} \cdot \bar{n})_y|_{BB^*C^*C} = -\frac{(200 \cdot 10^6)}{\sqrt{2}}.
 \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$ – тензоры напряжений и деформаций соответственно, ρ – плотность геосреды, λ, μ – константы Ламэ, \bar{g} – вектор ускорения свободного падения, \bar{u} – вектор перемещений, \bar{n} – вектор нормали к соответствующей поверхности.

Задача определения скорости фильтрации в районе скважины имеет вид:

$$\begin{cases}
\bar{\nabla} \cdot (\rho_f \bar{u}) = Q_{br} \\
-\bar{\nabla} p + \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu}{n} (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \right) - \left(\frac{\mu}{k} + \frac{Q_{br}}{n^2} \right) \bar{u} - \rho_f \bar{g} = 0, \quad \bar{u}|_{t=0} = 0; p|_{t=0} = 0, \\
p|_{BC, DE} = 0 \\
\bar{u} \cdot \bar{n}|_{CK, LH} = \bar{u} \cdot \bar{n}|_{DK^*, L^*G} \\
\bar{n}^T \cdot \left(-p\bar{I} + \frac{\mu}{n} (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \right) \cdot \bar{n}|_{AB, AF, EF} = -(\rho_f h|y| + p_k) \cdot \\
\bar{n}^T \cdot \left(-p\bar{I} + \frac{\mu}{n} (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \right) \cdot \bar{n}|_{KL, K^*L^*} = -\rho_f h|y|
\end{cases} \quad (2)$$

где \bar{u} – скорость Дарси, ρ_f – плотность флюида, n – пористость среды, Q_{br} – массовый источник флюида, p – поровое давление флюида, μ_f – динамическая вязкость флюида, k – проницаемость среды, p_k – давление на контуре питания скважины. Давление на контуре питания вычислялось из предположения о плоскорадиальном течении флюида к забою скважины.

Задача распределения степени минерализации флюида в районе скважины Г-1 решалась в предположение о его хлоридно-натриевом составе, что подтверждают гидрохимические исследования. Начальное распределение концентрации хлорида натрия задавалось линейным законом от 6 г/л на дневной поверхности до 11.7 г/л на нижней границы расчетной области. Распределение минерализации флюида C находится из решения задачи

$$\bar{u} \cdot \bar{\nabla} C = \nabla \cdot (D \bar{\nabla} C) + R, \quad \begin{cases} C|_{ABCDEFGH} = C_0(y); C|_{CK, LH} = C|_{DK^*, L^*G} \\ -\bar{n} \cdot \bar{N}|_{CK, LH} = \bar{n} \cdot \bar{N}|_{DK^*, L^*G}; \bar{N} = -D \bar{\nabla} C + \bar{u} C. (3) \\ -\bar{n} \cdot D \bar{\nabla} C|_{KL, K^*L^*} = 0 \end{cases}$$

где \bar{u} – скорость Дарси, C – концентрация хлорида натрия, D – коэффициент диффузии, R – объемный источник.

Возникновение потенциала V течения при фильтрации флюида в пористой среде вычислялось на основе задачи [6,11]:

$$\begin{cases} \bar{j} = -\frac{\varepsilon_\phi(C)\zeta(C,T)}{F\eta(C,T)} \nabla p - \sigma(C) \nabla V \\ \nabla \cdot \bar{j} = 0, j_z|_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где ε_ϕ – диэлектрическая постоянная флюида, ζ – дзета-потенциал, F – отношение удельного сопротивления флюида и твердого скелета, μ_f – динамическая вязкость флюида, p – поровое давление флюида, σ – удельная проводимость насыщенной породы, V – потенциал течения (электрокинетический потенциал), \bar{j} – удельная плотность тока. При этом для учета зависимости дзета-потенциала от степени минерализации флюида использовалась модель, описанная в работе [10].

Результаты расчетов. Асейсмичный период

Для анализа структуры распределения фильтрационных потоков, степени минерализации флюида и потенциала течения в районе скважины Г-1 в асейсмичные периоды времен были последовательно решены задачи фильтрации флюида (2), (3), (4) для случая отсутствия шаровой неоднородности упругих свойств.

В итоге было установлено, что

- миграция флюида, связанная с питанием скважины Г-1, локализована в районе разлома Совхозный и внедрения диоритов (слой №2) в интервале 450-70 метров, и интенсифицируется с глубиной. При этом максимальная скорость фильтрации в районе скважины составляет чуть больше 1 м/сутки (рис. 2);
- минерализация флюида на входе скважины определяется в основном минерализацией флюида более глубоких горизонтов. Среднее значение минерализации на входе в скважину, полученное в результате численного моделирования, равно 9.31 г/литр.
- в районе скважины потенциал течения достигает величины в -120 мВ.

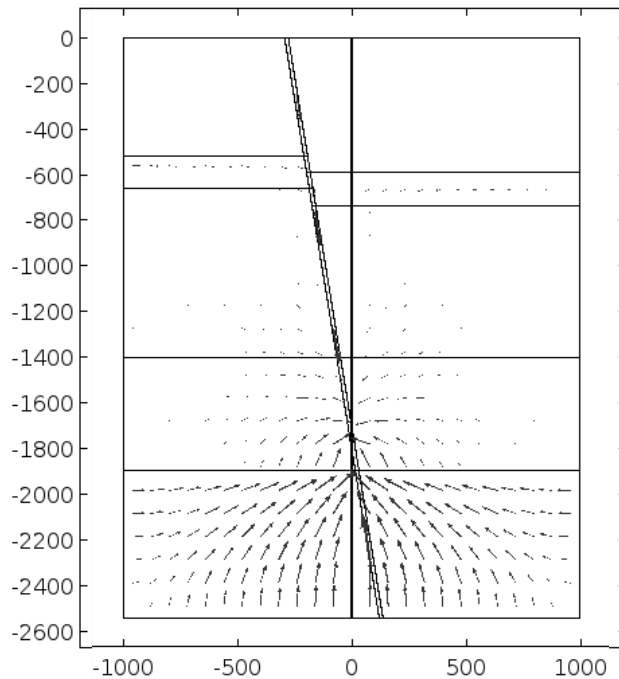


Рис. 2. Направление миграции флюида в районе скважины Г-1 (размер стрелок пропорционален величине скорости фильтрации).

Результаты расчетов. Временная окрестность землетрясения

Для моделирования эволюции электрокинетического тока при подготовке близкого сильного сейсмического события было выбрано событие, произошедшее в октябре 2009 года с магнитудой 5.2 на расстоянии 114 км от скважины Г-1[8]. Предполагалось, что параметры неоднородности упругих свойств не меняются во времени, кроме степени неоднородности. Она первые 4 суток не меняется, следующие 2 суток растет по квадратичному закону, а потом еще в течении 2 суток падает до фиксированной величины. Результаты расчета электрокинетического тока в районе измерительной скважины представлены на рисунке 3.

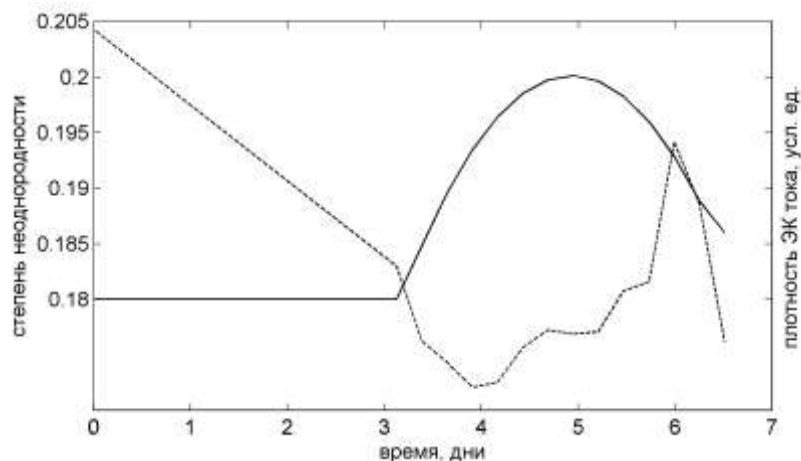


Рис. 3. Совмещенные диаграммы изменения степени неоднородности(сплошная линия)во времени и плотности электрокинетического тока (пунктирная линия) в районе забоя скважины.

Полученная кривая изменения электрокинетического тока в районе забоя скважины качественно повторяет огибающую ГАЭ (вертикальная компонент), измеренную в этой скважине (огибающая приведена в [8]).

Выводы

В работе предложена двух-масштабная модель эволюции геофизических полей в районе измерительной скважины Г-1, учитывающая конкретное геологическое строение района расположения скважины на Петропавловск-Камчатского геодинамическом полигоне и зависимость дзета-потенциала от степени минерализации флюида. На первом масштабном уровне решается задача изменения напряженно-деформированного состояния геосреды при чистом сдвиге, вызванного эволюцией шаровой неоднородности модуля сдвига. Шаровая неоднородность модуля сдвига является прообразом области формирующегося очага землетрясения. На втором масштабном уровне последовательно решаются задача нестационарной фильтрации флюида в пористой среде и задача эволюции электрокинетических токов, вызванных появлением потенциала течения при фильтрации минерализованного флюида. Расчетная область второго масштабного уровня учитывает конкретное геологическое строение среды в районе измерительной скважины. Для выбранного сейсмического события получена зависимость плотности электрокинетического тока от времени, которая качественно повторяет изменение огибающей геоакустической эмиссии во времени, измеренной в скважине Г-1 на глубине 1 км. Таким образом, в результате численного моделирования установлено, что интенсивность геоакустических процессов в районе измерительной скважины при подготовке землетрясения напрямую определяется электрокинетическими эффектами в насыщенной минерализованным флюидом пористой среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2682.2017.5).

Список литературы

1. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т. 414. № 3. С. 389-392.
2. Гаврилов В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // Физика Земли. 2011. № 11. С. 63-74.
3. Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52-67.
4. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А. Влияние фильтрационных процессов в горных породах на характеристики геоакустической эмиссии // Геофизические исследования. 2016. т. 17. № 2. С. 32-53.
5. Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В. Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 89-103.
6. D. V. Fitterman Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half-space // J. Geophys. Res. 1979b. V. 84(B11). Pp. 6031–6040.
7. Fitterman D.V. Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts // GEOPHYSICS. 1979. V. 44. N. 2. Pp. 195.
8. Gavrilov V.A., Pantelev I.A., Ryabinin G.V., Morozova Yu.V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks // Russian journal of Earth sciences. 2013. V.13. № 1. ES1002.
9. H. Mizutani, T. Ishido Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics // J. Geophys. Res. 1981. V. 86(B3). Pp. 1763–1775.
10. P.W.J. Glover, E. Walker, M.D. Jackson. Streaming-potential coefficient of reservoir rock: a theoretical model // Geophysics. 2012. V.77. N. 2. D17–D43.
11. R. P. Rastogi, R. C. Srivastava Nonequilibrium thermodynamics of electrokinetic phenomena // Chem. Rev. 1993. V. 93(6). Pp. 1945–1987.
12. T. Ishido, H. Mizutani Relationship between fracture strength of rocks and ζ -potential // Tectonophysics. 1980. V. 67. Pp. 13–23.
13. T. Ishido, O. Nishizawa Effects of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression // J. Geophys. Res. 1984. V. 89(B6). Pp. 4153–4159.