

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пантелеев И.А.¹, Гаврилов В.А.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, ria@icmtt.ru

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

Введение

Многолетние скважинные геоакустические и электромагнитные измерения, проводимые на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона, позволили установить, что в сейсмически спокойные периоды изменения среднеквадратических значений (СКЗ) геоакустической эмиссии (ГАЭ) в скважинах определяются изменениями напряженности электрической составляющей внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) в районе той же скважины (рис.1.). Во временных окрестностях недалеких крупных землетрясений влияние ЭМИ на ГАЭ существенно снижается, в отдельных случаях совсем пропадает [1,6]. Привлечение дополнительных данных гидрогеохимического и гидрогеодинамического скважинного мониторинга позволило авторам предложить физическое обоснование наблюдаемого явления – модуляции уровня ГАЭ внешним ЭМИ и ее нарушение при подготовке крупных землетрясений [2]. Основой этого обоснования является существование двойных электрических слоев (ДЭС) на границе раздела твердой и жидкой фаз во флюидонасыщенной пористой среде. Плотность зарядов ДЭС порово-трещинного пространства оказывает существенное влияние на характер его эволюции. В сейсмически спокойные периоды влияние токов проводимости, вызванных действием внешнего электромагнитного поля, на плотность зарядов ДЭС является определяющей. На заключительной стадии подготовки тектонического землетрясения происходит интенсивное изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды сопровождающееся перераспределением порового давления флюида. Данный процесс ввиду наличия ДЭС провоцирует появление токов электрокинетической природы, которые в свою очередь наряду с токами проводимости влияют на результирующую плотность зарядов ДЭС.

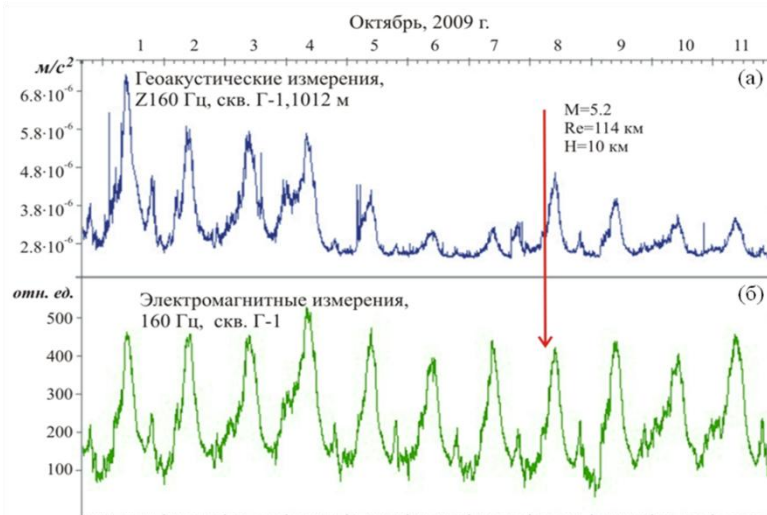


Рис. 1. Временные вариации среднеквадратических значений ГАЭ и ЭМИ во временной окрестности сейсмического события: (а) - суточные вариации СКЗ ГАЭ (вертикальная компонента) на глубине 1012 м при фильтрации третьоктавным фильтром с центральной частотой 160 Гц; (б) - суточные вариации СКЗ ЭМИ при фильтрации третьоктавным фильтром с центральной частотой 160 Гц. Интервал осреднения 5 мин.

Поскольку интенсивность фильтрационных потоков, вызванных увеличением скорости изменения НДС в районе формирующегося очага землетрясения, контролируется градиентом надгидростатического порового давления, то изменения уровня ГАЭ, обусловленные изменением плотности зарядов ДЭС, также будут связаны с изменением градиента надгидростатического порового давления. Это означает, что влияние фильтрационных потоков, а как следствие и

электрокинетического тока на геоакустическую эмиссию будет проявляться в изменении тренда ГАЭ. Поэтому результаты численных расчетов будут сопоставляться с трендовой составляющей данных скважинных измерений ГАЭ. Для проверки предложенного физического механизма была построена математическая модель эволюции электрокинетического тока при подготовке тектонического землетрясения.

Постановка задачи.

Для моделирования эволюции электрокинетического тока при подготовке тектонического землетрясения в качестве модели очага землетрясения была выбрана модель очага по И.П. Добровольскому [3]. Область очага будущего землетрясения представляет собой ограниченную в пространстве область с модулем сдвига, отличным от окружающей среды – неоднородность упругих свойств. Центральным положением модели подготовки тектонического землетрясения И.П. Добровольского является то, что начало стадии появления краткосрочных предвестников соответствует началу распада неоднородности – уменьшению степени отличия модуля сдвига неоднородности от модуля сдвига окружающей среды при сохранении объема неоднородности. При этом момент полного исчезновения неоднородности упругих свойств соответствует моменту наступления землетрясения. В рамках такого подхода возмущение напряженно-деформированного состояния геосреды, вызванное появлением неоднородности, задается известным решением задачи Эшелби о шаровой неоднородности в упругом полупространстве. Для дальнейших расчетов будет использовано выражение для объемной деформации упругого полупространства с шаровой неоднородностью [3]:

$$\varepsilon = 2(1-2\nu)Gxy \left(\left[\frac{1}{r_1^5} \right] + \frac{3-4\nu}{r_2^5} - \frac{10H(z+H)}{r_2^7} + 2R^2 \left(\frac{7(z+H)^2}{r_2^9} - \frac{1}{r_2^7} \right) \right), \quad (1)$$

где $G = \frac{\alpha\tau R^3}{2\pi\mu(1-\nu)}$, $r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-H)^2}$, $r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+H)^2}$, α – относительное изменение модуля сдвига в неоднородности, μ – модуль сдвига среды, [Па], ν – коэффициент Пуассона, τ – касательные напряжения на бесконечности, [Па], H – глубина заложения неоднородности, [км], R – радиус неоднородности, [км], слагаемое в квадратных скобках имеет место только вне однородности. Изменение порового давления определяется известными соотношениями линейной теории фильтрации с учетом скорости изменения объемной деформации в среде.

$$\beta \frac{\partial p(x, y, z, t)}{\partial t} - \frac{k}{\mu_L m_0} \nabla^2 p(x, y, z, t) = -\gamma \frac{\partial \varepsilon(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где $p(x, y, z, t)$ – избыточное (надгидростатическое) поровое давление, [Па], β – коэффициент сжимаемости поровой жидкости, [Па⁻¹], k – проницаемость породы, [м²], μ_L – динамическая вязкость поровой жидкости, [Па с], m_0 – пористость породы, $\varepsilon(x, y, z, t)$ – объемная деформация породы, вызванная появлением неоднородности, γ – коэффициент пропорциональности между объемной деформацией однородной среды и пор. Это уравнение следует из уравнений баланса масс жидкой фазы и баланса количества движения исключением скорости жидкой фазы и в предположении о линейной связи между объемной деформацией исходной среды и объемной деформации пор. Эта связь выражается коэффициентом пропорциональности γ . В правой части уравнения (2) стоит скорость изменения объемной деформации, которая является управляющим параметром. Принимая гипотезу, что физико-химические свойства флюида (вязкость, коэффициент сжимаемости), заполняющего порово-трещинное пространство геосреды в районе готовящегося землетрясения, не изменяются со временем, можно сделать вывод, что на характер эволюции порового давления при подготовке землетрясения, а как следствие и изменение флюидонасыщенности среды, существенно влияет величина пористости среды и связанной с ней проницаемости.

Расчет электрокинетического тока производился на основе общих соотношений, описывающих электрокинетические эффекты первого и второго рода (потенциал течения и электроосмос), которые следуют из подходов неравновесной термодинамики, принципа Онзагера и теоремы Кюри, позволяющих записать связь термодинамических сил и термодинамических потоков различных рангов [8]. Итоговая задача нахождения электрического поля во флюидонасыщенной геосреде, вызванного изменением порового давления, имеет вид:

$$\begin{cases} \vec{j} = -\frac{\varepsilon_f \zeta}{F \mu_L} \nabla p(x, y, z, t) - \sigma \frac{1}{F} \nabla \varphi(x, y, z, t), \\ \nabla \cdot \vec{j} = 0, j_z|_{z=0} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где $\sigma = F \sigma_f$ – удельная электропроводность флюидонасыщенной породы, [См м⁻¹]. На дневной поверхности принято граничное условие непротекания тока в атмосферу. В случае, когда рассматривается геосреда с однородными свойствами, решение задачи (3) тривиально: при произвольном распределении избыточного порового давления возникает такое электрическое потенциальное поле, что вызванный им ток проводимости в точности равен и противоположен по знаку электрокинетическому току. При этом только вертикальная компонента электрического поля не равна нулю, а ее величина определяется вертикальной компонентой градиента порового давления:

$$E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = C \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (4)$$

где E_z – вертикальная компонента напряженности электрического поля, φ – потенциал течения, C – коэффициент потокового потенциала. Таким образом, перераспределение флюида в геосреде, вызванное подготовкой и реализацией тектонического землетрясения, вызывает появление электрического поля электрокинетической природы, которое в свою очередь приводит к перераспределению зарядов двойных электрических слоев на границах раздела минеральный скелет – флюид, влияющих на интенсивность ГАЭ. Для исследования корреляции между изменением тренда ГАЭ и интенсивностью электрокинетических процессов была использована величина плотности электрокинетического тока, определяющаяся выражением $j_z^{ek} = \sigma E_z$.

Стоит отметить, что гипотеза однородности среды является очень сильной, в реальной же среде с ее сложным неоднородным строением ненулевыми будут и обе горизонтальные компоненты электрического поля. Существенное упрощение задачи, вызванное принятием такой гипотезы, позволяет на простом примере (с помощью прямого численного счета) проверить предложенный авторами физический механизм наблюдаемых при скважинных измерениях явлений. Вычисление дзета-потенциала базируется на модели ДЭС Гуи-Чемпена-Штерна для бинарного электролита. Отличительной чертой построенной математической модели является учет зависимости дзета-потенциала от температуры и степени минерализации флюида. Вычисление конкретной величины дзета-потенциала для точки скважинных измерений проводилось с привлечением теоретического подхода [7] и данных конкретных геохимических измерений [5].

Результаты моделирования.

На основе предложенного теоретического подхода проведено численное моделирование эволюции электрокинетического тока для двух различных сценариев подготовки тектонического землетрясения. Первый сценарий является предельным случаем, когда накопленная упругая деформация в области формирующегося очага, представляющей собой шаровую неоднородность упругих свойств, мгновенно передается окружающему пространству в момент времени $t = 0$.

Во втором сценарии учитывается стадия начала распада неоднородности путем принятия ряда гипотез о характере изменения параметров неоднородности. Как и для предельного случая, было принято, что объем неоднородности не меняется с течением времени до момента реализации сейсмического события. Эволюция параметра, отвечающего за относительное изменение модуля сдвига в неоднородности, имеет две участка. На первом происходит медленный незначительный рост параметра, связанный с действием тектонических напряжений, на втором – лавинообразное его уменьшение (степенное), вызванное распадом неоднородности и высвобождением накопленной упругой энергии. Лавинообразный характер формирования очага землетрясения на заключительной стадии подготовки является следствием нелинейного коллективного развития несплошностей геосреды, присущего всем деформируемым твердым телам и средам [4,9]. Также предполагается, что реализация землетрясения влечет за собой скачкообразный рост проницаемости пород, располагающихся в области неоднородности.

Решаемая задача об эволюции электрокинетического тока при подготовке одиночного сейсмического события является модельной с той точки зрения, что механические и физические свойства флюидонасыщенной среды, известные для одной единственной пространственной точки (точки расположения геофона в скважине Г-1), распространяются на все точки рассматриваемого объема. Этот факт навязан скудностью имеющихся данных о свойствах флюидонасыщенных горных

пород в конкретном заданном районе, но не мешает установлению качественной картины исследуемого процесса.

На рис. 2 представлены результаты численного решения задачи об эволюции электрокинетического тока при подготовке землетрясения, произошедшего 8 октября 2009 г., в сравнении с данными измерений, полученными на скважине Г-1.

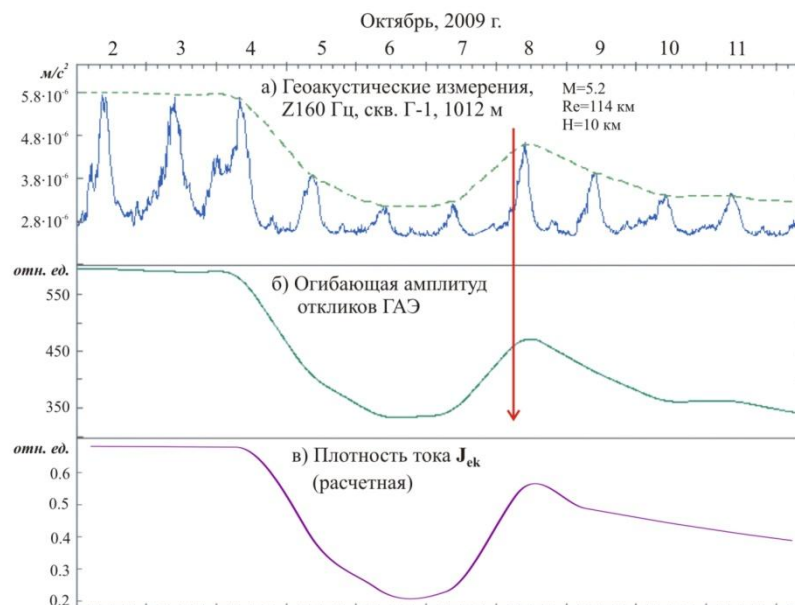


Рис. 2. Сравнение расчетных значений плотности электрокинетического тока (в) с изменениями огибающей (б) амплитуды откликов ГАЭ (а) во временной окрестности близкого землетрясения.

Приводимые данные показывают хорошее качественное согласование рассчитанных изменений электрокинетического тока с изменениями огибающей амплитуд откликов ГАЭ. Это подтверждает полученные ранее результаты, касающиеся физического механизма, обуславливающего изменения характеристик ГАЭ во временных окрестностях сильных тектонических землетрясений.

Авторы выражают признательность к. х. н. А. Наумову за содержательное обсуждение постановки задач и результатов работы. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 15-05-03225_a).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
4. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. Нелинейная динамика структур обострения в ансамблях дефектов как механизм формирования очагов землетрясения // Физика Земли. 2012. №6. С. 43-55.
5. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34-42.
6. Gavrilov V. A., Panteleev I. A., Ryabinin G. V., Morozova Yu. V. Modulating impact of electromagnetic radiation on geoaoustic emission of rocks // Russian Journal of Earth Science. 2013. V. 13, ES1002. doi:10.2205/2013ES000527.
7. Glover PWJ., Walker E., Jackson MD. Streaming-potential coefficient of reservoir rock: A theoretical model // Geophysics. 2012. V. 77. N. 2. D17-D43.
8. Overbeek J. Th. Thermodynamics of electrokinetic phenomena // Journal of Colloid Science. 1953. V.8. Pp. 420-427.
9. Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B. Model of geomedia containing defects: collective effects of defects evolution during formation of potential earthquake foci // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4. N. 1. Pp. 37-51.