

О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕНЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Гаврилов В.А.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, vgavr@kscnet.ru

Ранее по результатам многолетних измерений на Петропавловск – Камчатском геодинамическом полигоне был выявлен ряд закономерностей, отражающих влияние внешних слабых электромагнитных излучений (ЭМИ) звукового диапазона частот на характеристики геоакустической эмиссии (ГАЭ) околоскважинного пространства [2, 3, 5, 8]. При этом были выделены два основных эффекта. Во-первых, было показано, что для значительной части времени скважинных измерений характерна высокая коррелированность изменений среднеквадратических значений (СКЗ) ГАЭ и напряженности электрической составляющей внешнего ЭМИ, воздействующего на геосреду в районе той же скважины. Во-вторых, было установлено, что для временных окрестностей относительно сильных землетрясений коррелированность рядов ГАЭ и ЭМИ нарушается. В качестве примера, иллюстрирующего проявление указанных эффектов, на рис. 1 приведены результаты одновременных геоакустических и электромагнитных измерений в скважине

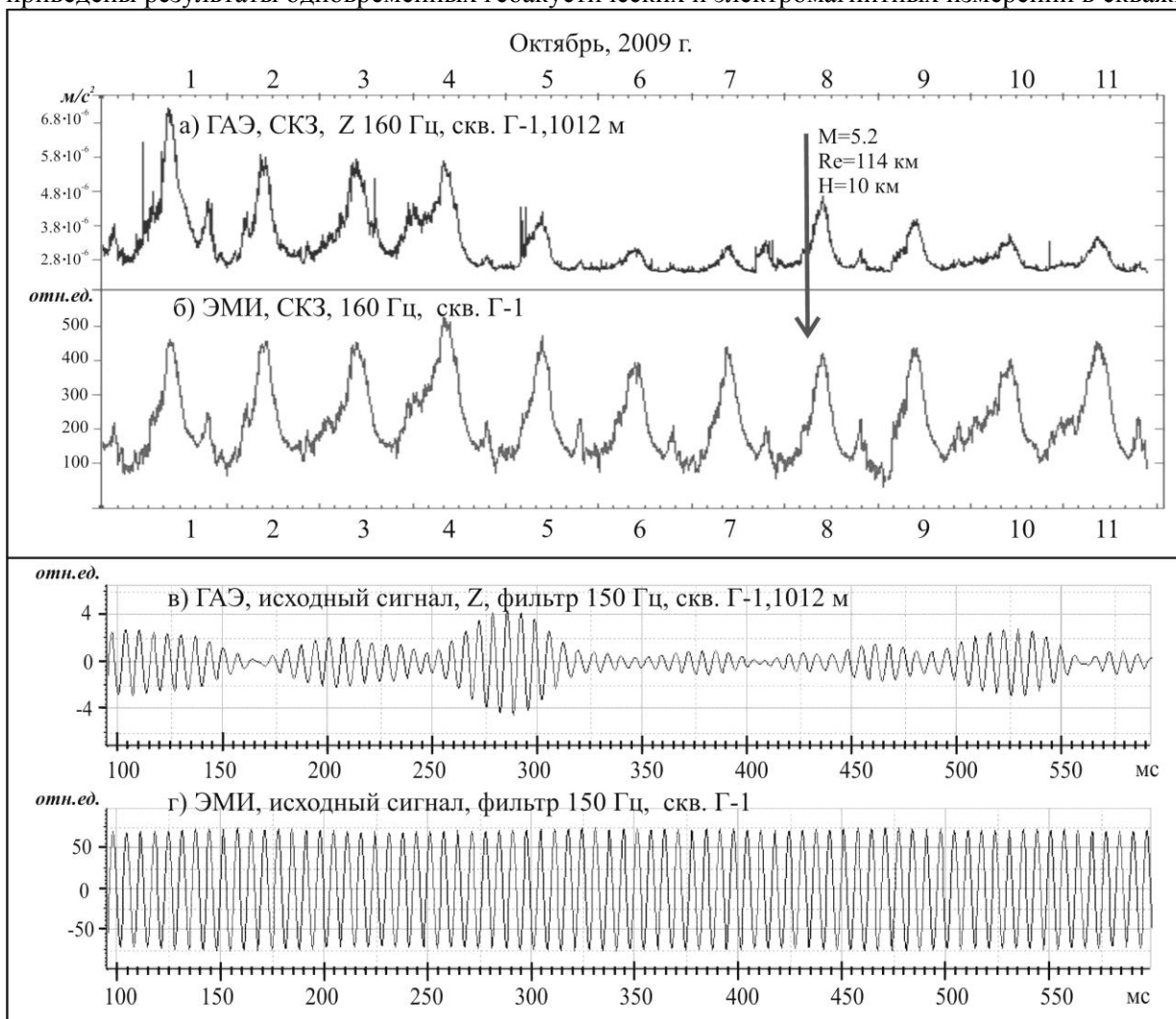


Рис. 1. Пример вариаций среднеквадратических значений ГАЭ и ЭМИ во временной окрестности близкого землетрясения:

(а) - среднеквадратические значения сигнала ГАЭ на глубине 1012 м в полосе 160 ± 20 Гц; (б) - среднеквадратические значения сигнала ЭМИ в полосе 160 ± 20 Гц; (в) – короткая реализация исходного сигнала ГАЭ в полосе 150 ± 20 Гц; (г) – короткая реализация исходного сигнала ЭМИ в полосе 150 ± 20 Гц.

Г-1 Петропавловск – Камчатского геодинамического полигона в октябре 2009 г. Геоакустические данные были получены на глубине 1012 м с использованием геофона с пьезоэлектрическими датчиками типа А1612. Для электромагнитных измерений применялась подземная электрическая антенна [4]. Темное время суток для района скважины Г-1 характеризуется стабильным повышением (примерно на 5 дБ) амплитуды компоненты 150 Гц в спектре ЭМИ. Это определяет наличие четко выраженных суточных вариаций среднеквадратических значений ЭМИ при фильтрации исходного широкополосного сигнала ЭМИ полосовым фильтром с центральной частотой около 150 Гц (см. рис. 1б). Расчетное значение напряженности электрического поля в зоне скважины Г-1 на указанной глубине составляет примерно 1.0 мВ/м в полосе частот 160 ± 20 Гц. В этом случае эффект модулирующего электромагнитного воздействия на интенсивность ГАЭ проявляется в корреляции суточных вариаций рядов среднеквадратических значений ГАЭ (рис. 1а) и ЭМИ (рис. 1б). Суть второго эффекта отражается в изменении характера ГАЭ во временной окрестности близкого землетрясения.

Исходный широкополосный сигнал ГАЭ в общем случае представляет собой последовательность взаимно наложенных или близко следующих друг за другом отдельных импульсов. Приводимые на рис. 1в и рис. 1г примеры коротких (0.5 с) реализаций исходных сигналов ГАЭ и ЭМИ являются результатом узкополосной цифровой фильтрации с центральной частотой 150 Гц исходных широкополосных электромагнитных и геоакустических сигналов. Эти данные показывают, что геоакустическая и электромагнитная компоненты частоты 150 Гц имеют разный генезис.

В рамках настоящей статьи представлены результаты исследований физического механизма первого из вышеуказанных эффектов - эффекта модулирующего электромагнитного воздействия на интенсивность ГАЭ.

Для понимания физических причин и механизмов, обуславливающих изменения тех или иных характеристик ГАЭ, необходимо учитывать, что, как правило, речь идет о процессах, происходящих в гранулированной флюидонасыщенной геосреде, а значит – о взаимодействии твердой и жидкой фаз с учетом наличия на границе их раздела двойного электрического слоя (ДЭС). Современные представления о строении ДЭС базируются на модели Гуи – Чепмена – Штерна [1,7]. Согласно указанной модели ДЭС состоит из двух частей: слоя потенциалопределяющих ионов, образующих внутреннюю часть ДЭС, и внешней части, образованной слоем противоионов. Противоионы, в отличие от локализованных на поверхности твердой фазы потенциалобразующих ионов, расположены в жидкой фазе объемно. Одна часть противоионов непосредственно примыкает к межфазной поверхности за счет химической адсорбции и электростатических сил, образуя плотный адсорбционный слой. Другая часть противоионов находится в диффузном слое, содержащем ионы обоих знаков (с преобладанием противоионов). В целом противоионы образуют объемный заряд, равный по величине и противоположный по знаку заряду слоя потенциалопределяющих ионов. Диффузный слой состоит из неподвижной и подвижной частей, которые разделяются плоскостью скольжения, за пределами которой в диффузном слое становится возможным движение ионов. Неподвижная часть диффузного слоя в общем случае включает в себя слой неподвижной воды толщиной в один или несколько молекулярных слоев, непосредственно прилегающий к границе раздела фаз. При относительном движении фаз этот слой движется вместе с твердой фазой. Наиболее распространенной моделью ДЭС является модель в виде одного плоского микроконденсатора [1]. Одна обкладка такого конденсатора образована слоем потенциалобразующих ионов на поверхности твердой фазы, а другой обкладкой является слой противоионов, расположенный в жидкости.

Согласно современным представлениям ГАЭ связана, в первую очередь, с шумами процессов переупаковки, происходящих в гранулированной геосреде под воздействием механических напряжений. Характер пород в зоне скважины Г-1 позволяет рассматривать порово-трещинное пространство прискважинной зоны как систему с двойной пористостью, состоящей из слабопроницаемых гранул, расчлененных капиллярами, наполненными жидким флюидом.

Пусть на i -ю гранулу породы действует механическая сила F_i , направленная параллельно (по касательной) границе раздела фаз. Учитывая, что в тонких капиллярах жидкость ведет себя как вязкопластическое тело, обладающее сопротивлением сдвигу [6], то движение гранулы под воздействием силы F_i будет возможно при условии: $\tau_i - F_i < 0$, где τ_i – сила вязкого трения для ДЭС i -й гранулы. При наличии в среде электрического поля на каждый произвольный элемент поровой жидкости объемом dV будет действовать сила ρdV , где E – напряженность действующего электрического поля, ρ – объемная плотность заряда для рассматриваемого элемента объема. При стационарном режиме объемная сила ρdV будет компенсироваться силами вязкого трения τ , действующими на поверхности, ограничивающими этот элемент объема.

Пусть внешнее переменное электрическое поле воздействует на рассматриваемый элемент объема геосреды в направлении, нормальном к поверхности раздела фаз, и выражается синусоидальной функцией с нулевой начальной фазой: $E(t)_{\text{вн}} = E_m \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сигнала. С учетом наличия электростатического поля ДЭС, для результирующей напряженности электрического поля, действующего на элемент объема жидкости, можно записать: $E = E_0 + E_m \sin \omega t$, где $E_0 = -\chi \varphi_0 \cdot \exp(-\chi x)$ – напряженность электростатического поля ДЭС для рассматриваемого элемента объема жидкости, φ_0 – потенциал поверхности, χ – параметр Дебая, x – расстояние по нормали от поверхности твердой фазы.

Опуская промежуточные выкладки, получим следующее выражение для изменений силы трения τ_s при внешнем гармоническом электромагнитном воздействии:

$$\tau_s(t) = (E_{s0} + E_m \sin \omega t) \cdot \left(q_{s0} - \frac{\sigma S E_m \cos \omega t}{\omega} \right) \approx q_{s0} E_{s0} + E_m A \sin(\omega t - \psi), \quad (1)$$

где E_{s0} – напряженность электростатического поля ДЭС на расстоянии s от поверхности твердой фазы; q_{s0} – не связанный с внешним переменным электрическим полем заряд за пределами выбранной плоскости. Величины A и ψ будут определяться выражениями:

$$A = \sqrt{q_{s0}^2 + \left(\frac{\sigma S E_{s0} E_m}{\omega} \right)^2}; \quad \text{ctg } \psi = \frac{q_{s0} \omega}{E_{s0} \sigma S}.$$

Из выражения (1) следует, что при внешнем гармоническом электромагнитном воздействии сила трения между неподвижной и подвижной частями диффузного слоя ДЭС будет изменяться относительно среднего значения $q_{s0} E_{s0}$ с частотой электромагнитного воздействия и отставанием по фазе на величину ψ . Амплитуда изменений силы трения будет зависеть от удельной электропроводности жидкого флюида, напряженности электрического поля и частоты внешнего ЭМИ. В масштабе макрообъема геосреды периодическое уменьшение силы трения τ_s под воздействием внешнего ЭМИ до величины $\tau_s \leq \tau_{s\text{ноп}}$ (рис. 2б) будет способствовать увеличению

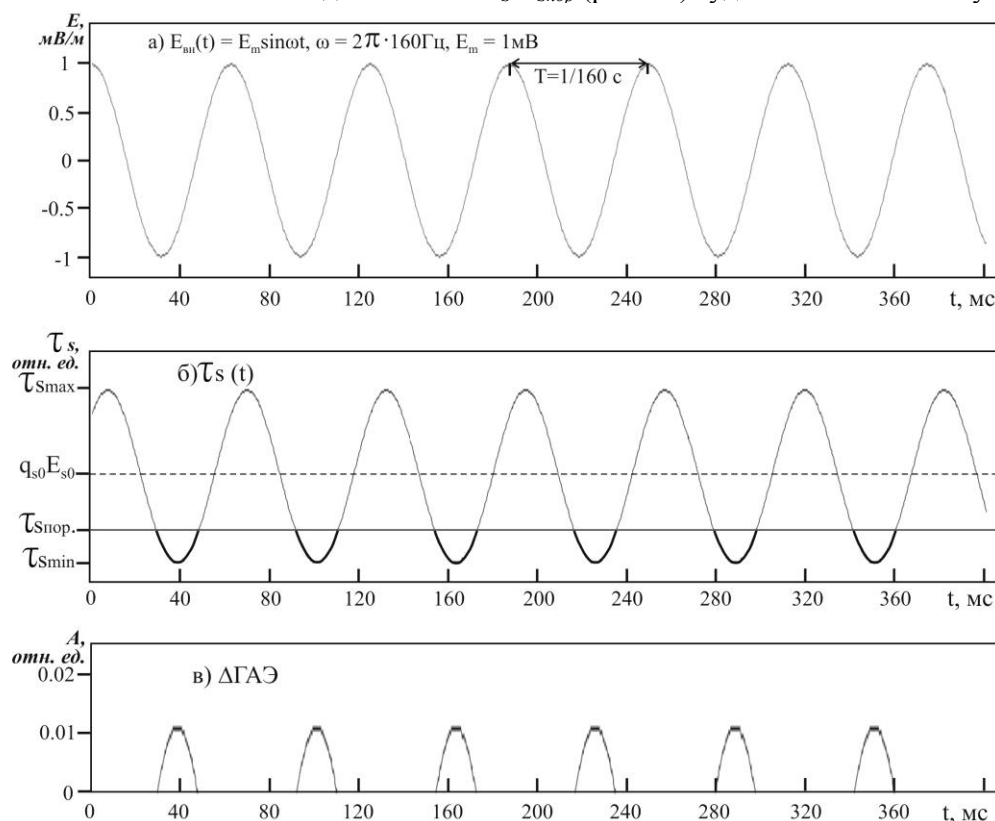


Рис. 2. Изменения ГАЭ в масштабе отдельных гранул под воздействием внешнего ЭМИ с неизменной амплитудой напряженности электрического поля.

числа актов движения твердой фазы относительно жидкого флюида под воздействием действующих механических напряжений, связанных с тектоническими напряжениями, литостатическим давлением, воздействием сейсмических волн и приливов и пр. (рис. 2в).

Изменения $F_i(t)$ при воздействии гармонического поля с медленно меняющейся амплитудой напряженности. Основные результаты совместных геоакустических и электромагнитных измерений на Петропавловск – Камчатском геодинамическом полигоне были получены для случая воздействия на геосреду переменного электрического поля с меняющейся в течение суток амплитудой напряженности. В этой связи рассмотрим ситуацию, когда напряженность внешнего электрического гармонического поля $E_{вн}(t) = E_m \sin \omega t$ медленно изменяется во времени: $E_m = E_s \sin \Omega t$, $\Omega \ll \omega$. На рис. 3 в графической форме представлены результаты расчетов силы

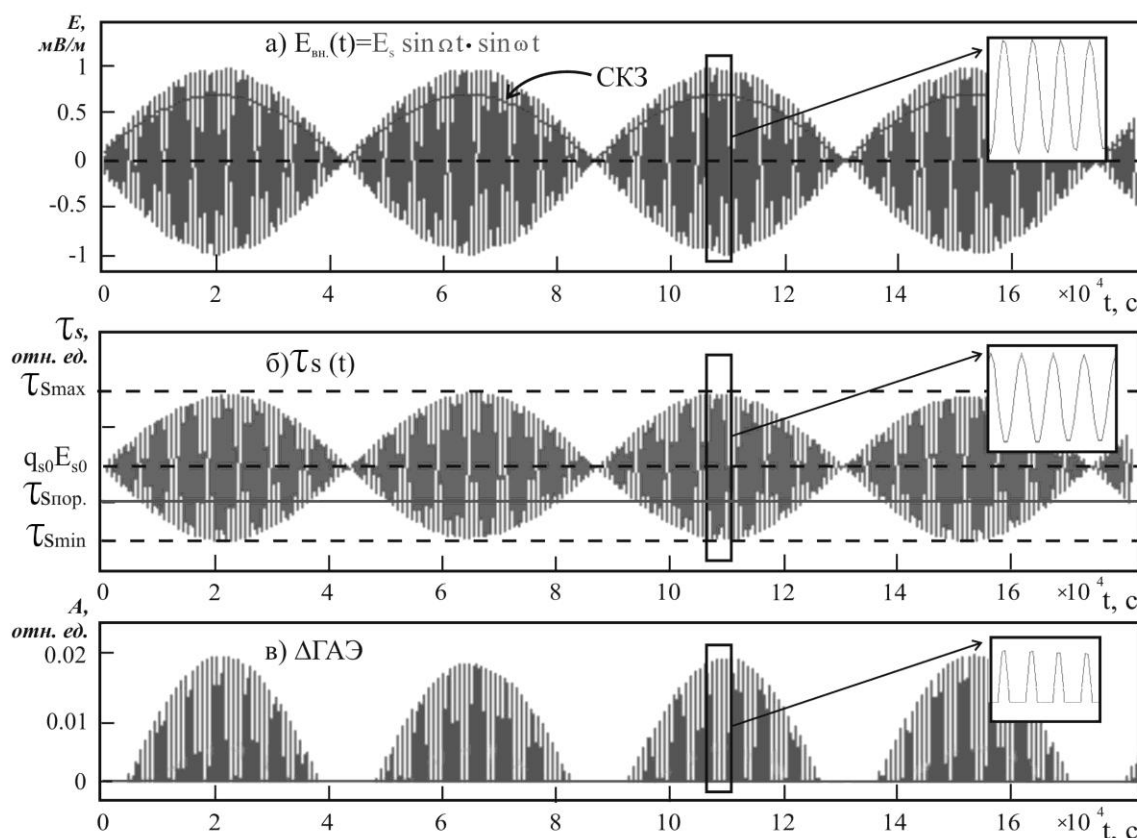


Рис. 3. Изменения амплитуд откликов ГАЭ при воздействии внешнего электрического поля с медленно изменяющейся амплитудой напряженности: а) изменения напряженности внешнего ЭМИ; б) изменения силы τ_s ; в) приращения изменения амплитуд откликов ГАЭ.

трения τ_s при воздействии на ДЭС внешнего гармонического электрического поля, напряженность которого E_m изменяется по синусоидальному закону с периодом $T=24$ ч от 0.2 мВ/м до 1.0 мВ/м: $E_{вн}(t) = E_m \sin \omega t$, $E_m = E_s \sin \Omega t$, $\omega = 2\pi \cdot 160$ Гц, $\Omega = 7.27 \cdot 10^{-5}$ Гц. При таком характере воздействия сила трения τ_s будет модулироваться по закону изменения напряженности внешнего электрического поля $E_m = E_s \cdot \sin \Omega t$. Для каждого достаточно короткого временного интервала, на котором величину E_m можно считать постоянной (врезка на рис. 3а), изменения величины силы τ_s для ДЭС будет соответствовать рассмотренному выше случаю воздействия гармонического электрического поля с постоянной амплитудой (врезка на рис. 3б). В масштабе макрообъема геосреды на подобных коротких интервалах характерными будут периодические изменения ГАЭ с частотой ω (врезка на рис. 3в). Однако на интервалах продолжительностью $T \geq 2\pi/\Omega$ уже будет сказываться периодичность изменений амплитуды напряженности внешнего электрического поля $E(t)_{вн}$ с частотой Ω , приводящее к модуляции амплитуды силы τ_s с частотой Ω (рис. 3в). В соответствии с изменениями величины силы τ_s уровень ГАЭ в масштабе макрообъема геосреды на таких интервалах также будет модулироваться с частотой Ω (рис. 3в).

Необходимо подчеркнуть, что для реальной геосреды изменения величины τ_s под воздействием слабого гармонического электрического поля с напряженностью порядка единиц мВ/м для каждого единичного ДЭС крайне (на 10 порядков и более) малы в сравнении с воздействием электростатического поля ДЭС. Однако при измерениях в скважине регистрируемое геоакустическое излучение является суперпозицией излучений от очень большого числа отдельных точечных источников ГАЭ, действующих одновременно в разных точках контролируемой геофоном «шумовой» зоны. При измерениях в достаточно глубокой скважине такая зона для частот 150 -160 Гц может иметь форму сферы с радиусом не менее первых сотен метров [7]. Значительные размеры «шумовой» зоны определяют очень большое число одновременно регистрируемых геоакустических импульсов от отдельных точечных источников, связанных с процессами перераспределения поля механических напряжений. Следствием этого является повышение значений сигнал/шум до уровня, позволяющего наблюдать проявление эффектов модулирующего воздействия непрерывного слабого ЭМИ на интенсивность ГАЭ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-05-08790).

Список литературы

1. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высшая школа, 1984. -519 с.
2. 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.
3. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т.414. №3. С. 389-392.
4. Гаврилов В.А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25-38.
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. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГГУ. 2005. 519 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. СПб.: АНО НПО «Профессионал». 2004. 838 с.
8. 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 sciences. 2013. V. 13. No. 1. ES1002. doi:10.2205/2013ES000527.