



УДК 550.348; 550.37

## **К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**Гаврилов В.А.<sup>1</sup>, Богомолов Л.М.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, [vgavr@kscnet.ru](mailto:vgavr@kscnet.ru)

<sup>2</sup> Научная станция РАН, Бишкек.

С 2000 г. Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на пункте Г-1, расположенном в районе г. Петропавловска-Камчатского, ведутся комплексные геофизические измерения, ориентированные на разработку новых методов геофизического мониторинга и прогноза землетрясений. Пункт оснащен скважиной глубиной 2540 м. Скважина самоизливающаяся, обсажена на всю глубину. С августа 2000 г. на пункте ведутся непрерывные геоакустические измерения в диапазоне 30-1200 Гц с установкой геофона в скважине на глубине 1035 м. Для геоакустических измерений используется трехкомпонентный геофон МАГ-3С [3] с датчиками на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков. Геофон прижат к обсадной трубе скважины рессорной пружиной. Аппаратурным комплексом, расположенным у устья скважины, производится дополнительное усиление и разделение исходных сигналов датчиков геофона полосовыми фильтрами на четыре полосы с центральными частотами 30, 160, 560 и 1200 Гц с измерением средневывраженных значений сигналов на выходах каждого из фильтров. Дальнейшая обработка сигналов производится микропроцессорным контроллером, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование поступающих на вход сигналов, вычисление средних значений сигналов на интервале в одну минуту, а также запись данных в память. Согласно полученным результатам [4], установка геофона на достаточно большой глубине позволила снизить влияние шумов техногенного происхождения более чем на два порядка, а также практически полностью устранить влияние метеоусловий на результаты измерений вертикальной компоненты сигнала. В мае 2003 г. на пункте были начаты непрерывные электромагнитные измерения в том же диапазоне частот с использованием подземной вертикальной электрической антенны. Для электромагнитных измерений применена подземная электрическая антенна, элементами которой являются свободная жила кабеля геофона длиной более километра и обсадная труба скважины. В остальном тракты электромагнитных и геоакустических измерений идентичны, измерения проводятся в одних и тех же частотных диапазонах. Синхронные скважинные геоакустические и электромагнитные измерения позволили получить два базовых результата.

Первый результат – выявленный эффект модулирующего воздействия естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) на интенсивность геоакустической эмиссии (ГАЭ) горных пород в условиях их естественного залегания. Как следует из результатов измерений (рис.1), в интервалах времени, соответствующих спокойной сейсмической обстановке в регионе, степень коррелированности временных рядов ГАЭ и уровня ЕЭМИ очень высока. Коэффициент корреляции  $\rho$  на таких интервалах имеет значения порядка  $\rho=0,81\div0,99$ . Например,  $\rho=0,91\div0,99$  для интервала 9-12 апреля 2004 г.

Суть второго результата - изменение характера геоакустического отклика геосреды на суточные вариации ЕЭМИ перед достаточно сильными близкими сейсмическими событиями. На таких интервалах характер вариаций уровней ГАЭ и ЕЭМИ существенно различался, коэффициент корреляции уменьшался до значений  $\rho=0,001\div0,80$ . (Интервал 13 апреля 2004 г., рис.1).

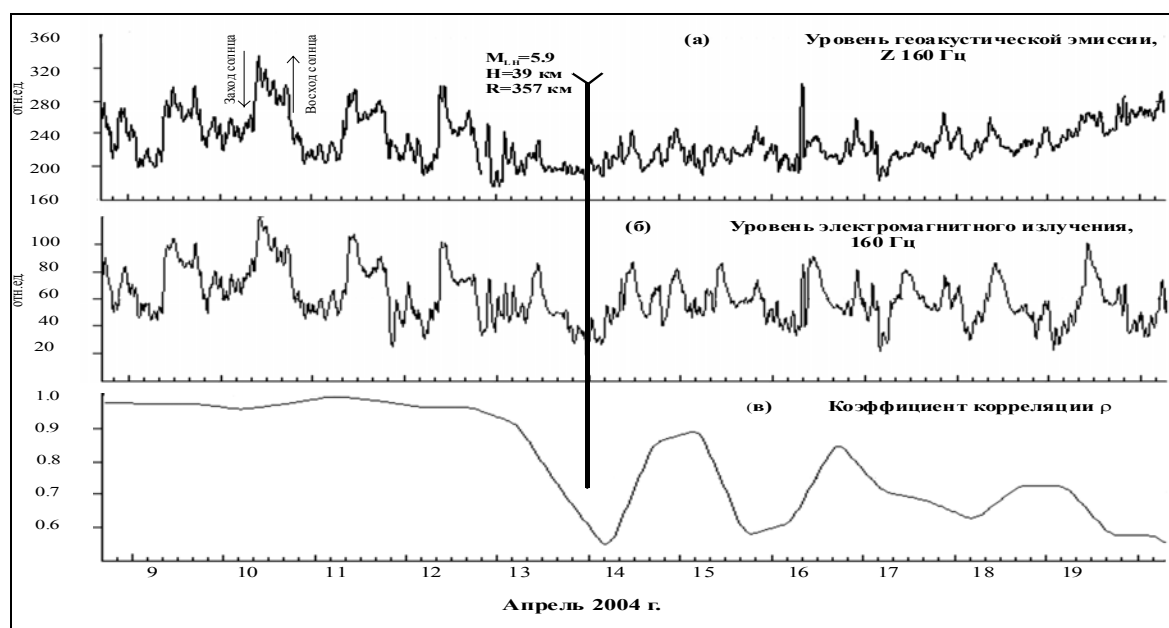


Рис.1. Пример результатов совместных геоакустических и электромагнитных измерений: а - уровень ГАЭ при частоте фильтра 160 Гц (Z компонента); б - уровень электромагнитного излучения при частоте фильтра 160 Гц; в – коэффициент корреляции  $\rho$ .

$M_{LH}$  – магнитуа землетрясения,  $H$  – глубина очага,  $R$ - эпицентральное расстояние.

Гипотезы о возможных физических причинах суточного хода уровня ГАЭ были высказаны ранее в [4,5]. Они базировались на сравнении данных натурных геоакустических и электромагнитных измерений с результатами экспериментов на прессах, в которых отмечен эффект прироста активности акустической эмиссии (АЭ) образцов геоматериалов, подвергавшихся дополнительному воздействию электромагнитных полей в условиях сжатия [1,6].

Данная работа посвящена более детальному сопоставлению как условий лабораторных экспериментов и натурных наблюдений, так и соответствующих результатов. Целью работы являлось уточнение факторов, благодаря которым может реализоваться высокая геоакустическая чувствительность горных пород земной коры к воздействию слабых электромагнитных полей естественного происхождения.

Для этого в Научной станции РАН в г.Бишкеке (НС РАН) были проведены новые эксперименты на образцах горных пород, позволяющие оценить степень влияния на величину порогового электровоздействия (ЭВ) физико-химических свойств геоматериалов, напряженно - деформированного состояния образца и параметров ЭВ. Как и в предыдущих исследованиях [6,7], применялась пружинная реологическая установка (УДИ, сжимающая нагрузка до 100 т [8]) и реологический стенд с длинноходовой пружиной, обеспечивающий усилие сжатия до 20 тонн. Как и ранее, в качестве источников модельных импульсов электромагнитного поля использовались измерительные генераторы Г5-54 и Г6-28, а также конденсаторный и индукционный разрядники. Электрические импульсы подавались на образец в ходе сеансов, длительность которых была в несколько раз меньше всего времени измерений при фиксированной нагрузке, но достаточной для набора представительной выборки событий АЭ. Длительность сеансов с воздействием поля на образец варьировалась в широких пределах, от 30 минут до нескольких часов для квазипериодических воздействий и от миллисекунды до нескольких секунд при разовых воздействиях. Изменения в методике экспериментов коснулись количества сеансов в измерительной сессии (т.е. на заданной ступени сжимающей нагрузки) и параметров электроимпульсов. В частности, проводились повторные сеансы ЭВ, в процессе которых менялась амплитуда и волновая форма электроимпульсов для оценок минимального (порогового) значения напряженности электрического поля, при которой еще наблюдается вызванный прирост активности АЭ. Для регистрации АЭ использовались датчики SE2MEG-P фирмы DECI (США) со средней чувствительностью  $1,8 \cdot 10^{-5}$  Па/В и широкополосные измерительные каналы (частотный диапазон от 80 кГц до 2,5 МГц), разработанные в НС РАН. В ходе экспериментов для различных образцов горных пород при различных величинах нагрузок оценивались соответствующие

пороговые значения напряженности электрического поля, при которых еще наблюдается вызванный прирост активности АЭ (т.е. отклик на ЭВ воздействие).

Согласно результатам ранее проведенных экспериментов [2,9] пороговая величина ЭВ, способного оказывать триггерное влияние на АЭ, определяется следующими тремя группами параметров:

- параметры физико-химических свойств материала образца: степень его водонасыщенности, наличие пьезоэлектрических фракций и макронеоднородностей;
- напряженно - деформированного состояние образца (степень удаленности от критической точки потери устойчивости);
- параметры ЭВ: повторяемость импульсов, их полярность (одно- или биполярные), крутизна фронтов.

В таблице 1 представлены результаты некоторых экспериментов, позволяющие оценить роль перечисленных групп параметров на пороговое значение ЭВ.

Таблица 1.

Образец	Относительная нагрузка	Режим электровоздействия	Пороговая напряженность В/м
Сухие гранитоиды	0,75-0,95	Непрерывная последовательность импульсов с частотой 1-3 кГц, длительностью 5-50 мкс	500
Водонасыщенная керамика диоксида циркония	0,75-0,95	— · — · — · — · — · — · — · — · —	200
Кварцит	0,15 - 0,95	— · — · — · — · — · — · — · — · —	200
Сухие гранитоиды	0,75-0,95	Серии одиночных импульсов через 10-50 с, длительность каждого ~ 0,5 мс	~ 5000
Гранит мелкозернистый	0,97	Циклическое с продолжительностью серий 2,5 - 3 мин с паузами 2,5 - 3 мин, в каждой серии воздействие непрерывной последовательностью импульсов с частотой 1-3 кГц и длительностью 5-50 мкс	50 – 100

Искусственное водонасыщение образцов позволяет снизить пороговые значения ЭВ более чем в два раза. Так для обычных, “сухих” образцов гранитоидов при одноосных сжимающих нагрузках в диапазоне 0,75-0,95 от уровня разрушения, характерная пороговая напряженность электрического поля имеет величину порядка  $E \sim 500$  В/м. Для искусственно водонасыщенных образцов, изготовленных из модельного материала – керамики диоксида циркония, эффект отклика АЭ наблюдался при амплитудах импульсов в 3-4 раза меньше, чем в экспериментах с сухими образцами гранитов и каменной соли, т.е. при прямоугольных однополярных импульсах с  $E \sim 200-300$  В/м.

Для образцов пьезоэлектрических материалов отклики на воздействие таких же электроимпульсов регистрировались в весьма широком диапазоне нагрузок: от 0,15 до 0,95 от уровня разрушения. На рис.2 показан один из откликов на низковольтное ЭВ на образец изначально трещиноватого кварцита Ат-Баши, Киргизстан с трещиной длиной 4 см (половина высоты образца), который сохранял несущую способность до напряжения 200 МПа. Отклик АЭ (рис. 2) отражает повышенную чувствительность образца к ЭВ как в силу его пьезоэлектрических свойств, так и из-за неоднородностей, обусловленных трещиной (концентрация напряжений, неоднородность электрической поляризации и др.).

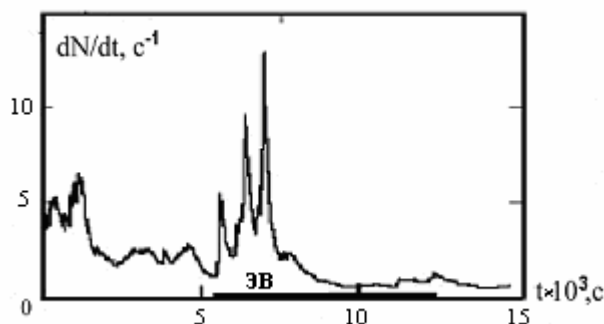


Рис. 2. АЭ отклик активности образца кварцита,  $k=0,95$ .  $E = 400$  В/м. Частота следования импульсов - 2,5 кГц, длительность - 20мкс. Период ЭВ отмечен полосой. N – число импульсов АЭ.

Согласно результатам проведенных экспериментов, одним из важнейших параметров, определяющих уровень АЭ чувствительности к ЭВ воздействию, является напряженно - деформированное состояние образца. Для энергонасыщенной среды (материал образца близок к разрушению) уже не требуется значительного уровня дополнительных внешних воздействий для того, чтобы происходило стимулированное выделение части энергии через АЭ. Действительно, при нагрузках  $k=0,96-0,99$  в сеансах с электроимпульсами относительно небольшой амплитуды отмечались отчетливые АЭ отклики обычных сухих образцов гранита и габбро, не содержащих видимых неоднородностей и повреждений (рис. 3).

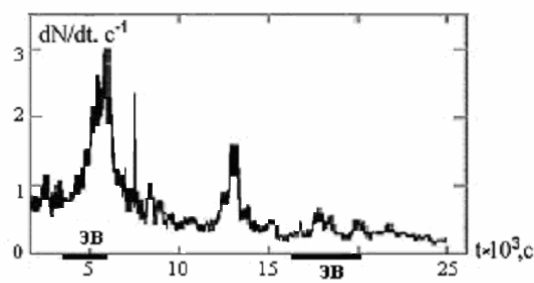


Рис.3. Пример АЭ отклика образца габбро, находящегося при околоразрушающей нагрузке ( $k=0,97$ ). Частота следования импульсов - 2,0 кГц, длительность 20мкс,  $E = 400$  В/м. Амплитуда электроимпульсов 30 В, т.е. меньше типичного значения 50 В, при котором, как правило, отмечался эффект вызванный ими прирост АЭ в диапазоне нагрузок  $0,7 < k < 0,95$ . Периоды ЭВ отмечены полосой. N – число импульсов АЭ.

Экстремальная чувствительность к ЭВ при околоразрушающих нагрузках проявилась также в наличии отклика на повторное воздействие. Как видно на рис. 3 при повторном ЭВ прирост активности был существенно меньше, чем в первом случае, тем не менее, он присутствует. Между тем для диапазона сжимающих нагрузок  $0,7 < k < 0,95$ , согласно [6,9] в таких случаях характерно либо полное пропадание отклика на повторные ЭВ, либо его ослабление до уровня флуктуаций (аналог эффекта Кайзера).

Результаты эксперимента, показывающего, что АЭ чувствительность образцов может значительно зависеть от режима ЭВ воздействия, представлены на рис. 4. В указанном эксперименте использовался образец гранита, находящийся при нагрузке  $k=0,9$ . Было проведено два сеанса длительностью по 1,5 час с периодическим электровоздействием прямоугольными импульсами каждые 2,5 - 3 мин. В некоторой мере указанный режим ЭВ воздействия аналогичен режиму ежесуточного воздействия ЕЭМИ на реальную геосреду. Как показали результаты эксперимента, при таком режиме электровоздействия АЭ отклики наблюдались даже при величинах напряженности электрического поля порядка 50 - 100 В/м. При обычном варианте ЭВ (непрерывная последовательность импульсов) для образцов этого материала при таких же нагрузках АЭ отклики наблюдались при напряженности электрического поля не ниже 500 В/м.

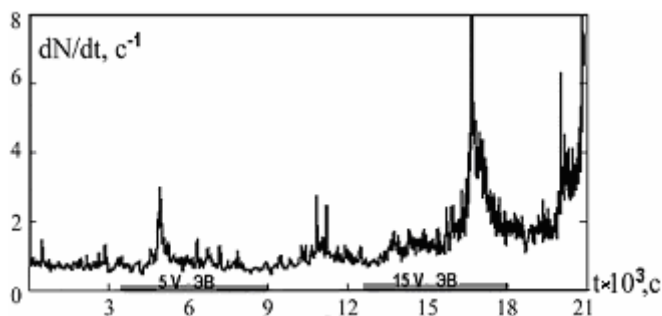


Рис.4. Возможность уменьшения порогового значения ЭВ при использовании циклического режима ЭВ воздействия (пояснения в тексте). Образец – гранит мелкозернистый,  $k=0,9$ .  $E = 100$  В/м (первый сеанс),  $E = 300$  В/м (второй сеанс). Периоды ЭВ отмечены полосой. N – число импульсов АЭ.

Согласно оценкам, приводимым в [5], наибольшие значения уровня электрической составляющей ЕЭМЗ на глубине 1000 м для частоты 160 Гц могут достигать величин не более  $0,16 \div 0,36$  мВ/м, что ниже уровня напряженности электрического поля при экспериментах на образцах горных пород как минимум на пять порядков. Между тем, оценивая условия измерений ГАЭ в скважине Г-1 необходимо отметить следующее.

1. Согласно данным по геологическому разрезу скважины Г-1 горные породы, через которые проходит скважина на глубине 1035 м (глубина установки геофона), имеют повышенную ГАЭ чувствительность к ЭВ в силу их пьезоэлектрических свойств (аргиллиты с прожилками кварца).
2. В условиях реальной геосреды несомненно наличие воды в трещинно-поровом пространстве, что согласно результатам экспериментов значительно снижает пороговое значение ЭВ.
3. Район г. Петропавловска-Камчатского отличается высоким уровнем сейсмической активности. В этой связи очевиден высокий уровень энергонасыщенности блочно-иерархической системы горных пород в данном регионе, что, согласно приводимым выше данным, также значительно снижает пороговое значения ЭВ.
4. Дополнительным фактором, способствующим повышенной ГАЭ чувствительности горных пород в районе скважины Г-1 к ЭВ, возможно является режим воздействия ЕЭМИ с суточными интервалами повышенной напряженности электромагнитного поля.

Можно предположить, что совокупное наличие указанных факторов, каждый из которых направлен на уменьшение порогового значения ЭВ, приводит к суммарному эффекту высокой геоакустической чувствительности горных пород к ЭВ. При этом необходимо отметить, что выявление корреляций уровня ГАЭ с изменениями напряженности ЕЭМИ стало возможным, прежде всего, благодаря проведению геоакустических измерений в скважине на значительной глубине при очень низком уровне помех экзогенного происхождения [4].

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности развития систем скважинных геоакустических и электромагнитных измерений на Камчатке и других сейсмоактивных зонах, в т.ч. в континентальных сейсмически активных регионах (Алтай, Байкал, Кавказ, Тянь-Шань).

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 06-05-96071).

#### Список литературы

1. Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Ключкин В. Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энерговоздействии // Физика Земли. 2006. 10. С. 36-42.
2. Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С. и др. Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энерговоздействиях физическими полями. // В сб.: Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С.168-172.
3. Беляков А.С. Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2000. Вып. 33. С. 27 - 45.
4. 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.
5. Гаврилов В.А. Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т.414. №3. С.389-392.
6. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов/ Под ред. Леонова Ю.Г.и Гольдина С.В. Москва- Бишкек: 2003. С. 304-324.
7. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. №6. С. 22-33.
8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.:Недра. 1985. 271 с.
9. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Zakupin A.S., et. al. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic- electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. N1. P. 65-72.