

УДК 548.4, 53.097, 534.221, 550.348 (575.2)(04)

ОСОБЕННОСТИ ПОТОКА АЭ СИГНАЛОВ НАГРУЖЕННЫХ  
ГРАНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ

*В.А. Мубассарова, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, Б.В. Боровский*

Продолжены исследования воздействия слабых вибраций на образцы гранита, испытываемых при постоянном сжатии. Показано, что для наиболее контрастных откликов акустической эмиссии (АЭ), характеризующихся приростом активности более чем на 15–20%, имеет место перераспределение сигналов АЭ по длительности и энергии.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия; вибрации; активность АЭ; горные породы; триггерное влияние.

**Введение.** Исследования вибровоздействий на акустическую эмиссию нагруженных образцов геоматериалов, проведенные в конце XX – начале XXI вв., продемонстрировали, что даже весьма слабые вибрации оказывают стимулирующее (триггерное) влияние на режим АЭ, отражающий изменение скорости неупругой деформации и кинетику микротрещин [1–4]. Эффект от вибраций кумулятивен, наступает с некоторой временной задержкой после включения источника вибраций и наблюдается задолго до разрушающей нагрузки. Он может рассматриваться как лабораторный аналог триггерного влияния вибраций естественной и техногенной природы на режим выделения сейсмической энергии. В совокупности эти эффекты являются свидетельством возможности технологического воздействия на сейсмогенерирующие среды для разрядки избыточных напряжений и снижения вероятности катастрофического землетрясения [1, 5–8].

Начиная с оригинальных работ [4, 5], где обнаружена взаимосвязь слабых вибраций и скорости пластической деформации образцов самых разных материалов, вибровоздействия моделировались различными источниками весьма слабых вибраций как, например, удар металлическим шариком, хлопок, мини-вибратор (буззер) и т.п. Общей чертой проведенных ранее экспериментов является нерезонансный механизм воздействия вибраций. При воздействии слабых вибраций инерция не могла играть роли, так как в этих случаях динамическая нагрузка была пренебрежимо мала по сравнению со стационарной и составляла величину порядка  $10^{-7} - 10^{-6}$  [3].

Ю.А. Трапезников придавал большое значение изучению различных аспектов реакции нагруженных образцов горных пород на модельные вибровоздействия. В этой связи в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред Научной станции (НС) РАН, г. Бишкек были предприняты попытки более углубленного изучения влияния вибраций на акустическую эмиссию в экспериментах по деформированию и разрушению образцов горных пород. В ходе однотипных испытаний на 100-тонном прессе серийные образцы подвергались различным дополнительным воздействиям [9–11]. Хотя целью экспериментов было сопоставление откликов на вибро- и электровоздействия и подготовка к осуществлению комбинированных воздействий, интересны некоторые новые результаты, связанные с особенностями виброактивации АЭ. Их описанию посвящена настоящая работа.

Стоит отметить, что детальные исследования эффектов слабых вибраций актуальны в связи с анализом не только искусственных, но и естественных экзогенных воздействий на сейсмический режим. Наибольшую известность приобрел случай влияния на режим выделения сейсмической энергии техногенных вибраций от водосбросов на плотине Нурекской ГЭС [4, 8]. Важным примером естественного явления, способного контролировать региональную сейсмичность, является возбуждение штормовых морских микросейсм. В работе [12] показано, что в период максимального развития морского волнения, вызывающего рост амплитуды микросейсм до уровня более 5 мкм (по данным сейсмостанции о. Шикотан, Курильские о-ва), происходит

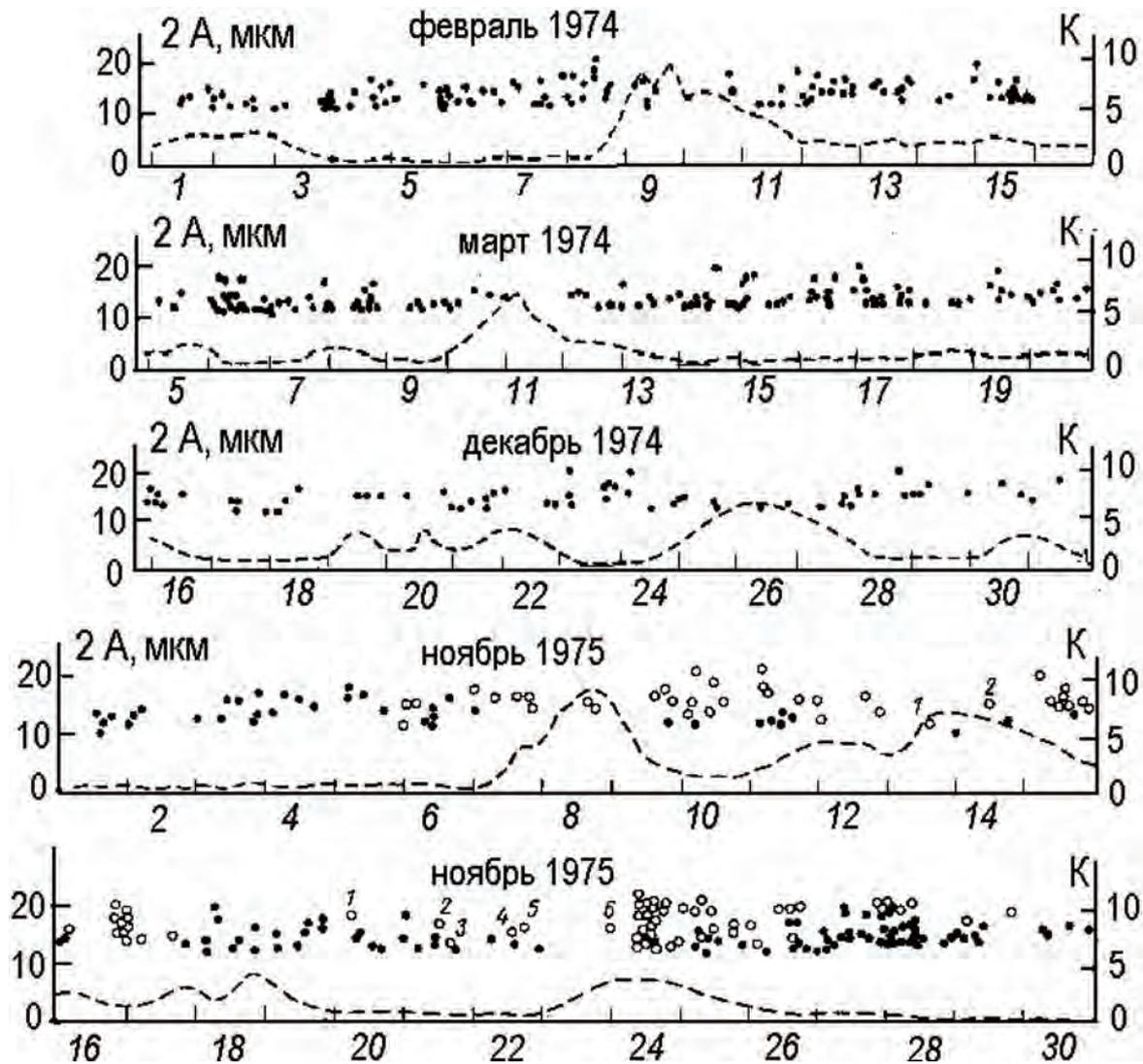


Рис. 1. Уменьшение числа событий локальной сейсмичности в круговой зоне радиусом 150 км вокруг сейсмостанции о. Шикотан при возрастании уровня микросейсм в штормовые сезоны, согласно [12].

уменьшение числа слабых местных землетрясений (в диапазоне классов  $6 < K < 10$ ) в районе, охваченном штормом. По мнению автора [12], это является следствием выделения накопленной тектонической энергии через инициирование сейсмических событий меньших классов (наведенную микросейсмичность). Суммарная энергия шторма, согласно [12], лежит в диапазоне  $10^8 - 10^{18}$  Дж, и преобразование даже незначительной части этой энергии в упругие волны может отразиться в сейсмическом режиме. На рис. 1 показан один из типичных примеров временных

зависимостей микросейсм и распределений числа локальных землетрясений в районе о. Шикотан. Графики на этом рисунке свидетельствуют, что на качественном уровне дело обстоит именно так, как и в случае водосброса на Нурекской плотине [13]: итогом является снижение вероятности возникновения умеренных по силе землетрясений. Между этими случаями можно установить и количественное соответствие по возмущениям давления др. Действительно, критическая амплитуда микросейсм, при достижении которой наблюдалось уменьшение сейсмической ак-

тивности, составляет  $A \sim 5$  мкм, что на порядок больше, чем в случае Нурекского водосброса. Но характерный частотный диапазон штормовых микросейсм (определенный по известным периодам штормовых микросейсм 5–8 с),  $\omega \sim 0,7 - 1,2$  с<sup>-1</sup>, где  $\omega$  – циклическая частота, на порядок меньше. Поэтому при сопоставимых с известным случаем вибраций у плотины Нурекского гидроузла [13] акустических сопротивлений (произведениях  $\rho \cdot V_s$ ), амплитуда возмущений  $\delta p$  для значений плотности  $\rho \sim 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и скорости упругих волн в среде по месту регистрации микросейсм  $V_s \sim 2 \cdot 10^3$  м/с оказывается порядка  $(\delta p)_{cr} \sim 50-100$  Па. Но и оценки  $\delta p$  вблизи Нурекской плотины, соответствующие критической амплитуде микросейсм  $A \sim 5$  мкм, дают величину того же порядка.

Вопросу о механизме влияния факторов, так или иначе связанных с погодой, на иницирование землетрясений малых и средних магнитуд до сих пор не уделялось достаточного внимания.

Сложность этого вопроса становится понятной, если обратить внимание на то обстоятельство, что вариации атмосферного давления при таких погодных явлениях как циклоны и антициклоны, могут составлять несколько мм ртутного столба, т.е. доли процента или даже более процента от 1 бар ( $\sim 10^5$  Па). Это, казалось бы, основной фактор влияния погодных изменений, поскольку по приведенной выше оценке  $(\delta p)_{cr} \sim 50-100$  Па. Однако в достаточно глубокие слои передается лишь незначительная часть колебаний атмосферного давления. В квазистатическом рассмотрении медленные изменения атмосферного давления гасятся в приповерхностном слое за счет переупаковки блоков, гранул и т.п. При описании изменений атмосферного давления как волны, падающей на дневную поверхность, амплитуду проходящей в недра волны можно оценить (пренебрегая затуханием) по коэффициенту пропускания, определяемому отношением акустических сопротивлений воздуха  $(\rho \cdot V_s)_2$  и твердой земли  $(\rho \cdot V_s)_1$  [14]. Зная значения плотности и скорости распространения акустических волн в воздухе ( $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_s = 340$  м/с) и земле ( $\rho = 2,2-2,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $V_s = 4-5$  км/с) можно определить значение коэффициента пропускания. Этот коэффициент намного меньше единицы:  $D \sim 2(\rho \cdot V_s)_2 / (\rho \cdot V_s)_1 \ll 1$ , и поэтому противоречие с критическими величинами для микросейсм  $(\delta p)_{cr}$ ,  $A_{cr}$  отсутствует.

Приведенные примеры показывают, что особенности тех или иных источников вибраций, т.е. структура вибровоздействий, могут играть

определяющую роль в формировании реакции среды. В связи с этим представляет интерес уточнение свойств акустоэмиссионных откликов образцов горных пород на вибровоздействия, регистрируемых в лабораторных экспериментах на бесшумных испытательных установках с контролируемыми параметрами дополнительно налагаемых вибраций.

**Методика экспериментов.** Эксперименты по исследованию влияний слабых вибраций на параметры АЭ различных геоматериалов проводились в Научной станции РАН (г. Бишкек) на пружинной реологической установке УДИ (максимальная сжимающая нагрузка 100 т) и на реологическом стенде с длинноходовой пружиной, обеспечивающей сжатие испытываемого образца с усилием до 20 тонн. Методика экспериментов детально описана в предыдущих работах, например [15]. Все измерительные сеансы проходили при фиксированной нагрузке. В случае экспериментов на УДИ для моделирования локального характера вибровоздействий применялся точечный источник (буззер), плотно закрепляемый на образце. При испытаниях образцов на реостенде использовалась электродинамическая головка, установленная на верхней опоре соосно образцу с передачей вибровоздействия через конструкцию установки. Для организации вибросеансов на буззер или электродинамическую головку подавался синусоидальный сигнал генератора ГЗ-33 или ГЗ-112. В течение вибросеанса контролировалось постоянство амплитуды и частоты сигналов на входе вибропреобразователя (источника).

Сигналы акустической эмиссии регистрировались широкополосным датчиком (тип SE2MEG-P, производство DECI, США) в частотном диапазоне от 80 кГц до 2 МГц. Сигналы оцифровывались быстродействующими АЦП, работающими в стандарте КАМАК, и записывались на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме.

**Результаты экспериментов.** В ходе экспериментов было выявлено влияние вибровоздействий на скорость накопления дефектов, которое наиболее эффективно проявлялось при величине напряжений в образцах, составляющей 65–70% и более от разрушающей. При более низких напряжениях вибрационная активация АЭ или не наблюдалась, или она происходила с очень большими задержками во времени и была незначительной. В большинстве случаев рост активности АЭ происходил с некоторой задержкой (20–25 минут) после включения вибровоздей-

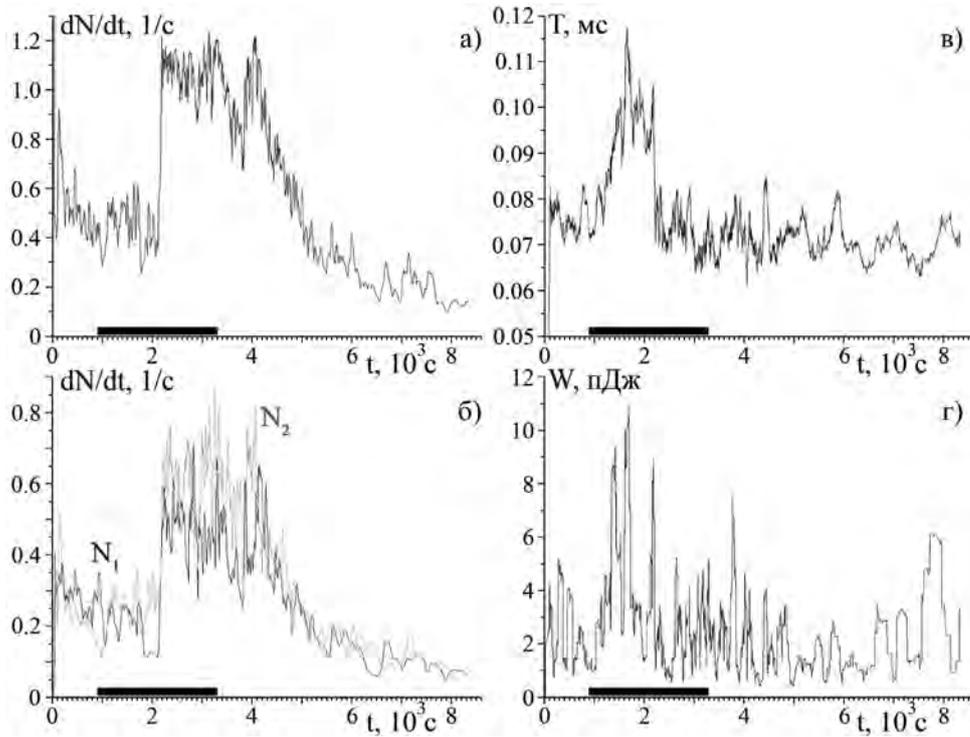


Рис. 2. Временные зависимости: а – активности общего числа зарегистрированных событий АЭ гранита в сессии с вибровоздействием при постоянной нагрузке 67% от разрушающей; б – активностей слабых (черная кривая,  $N_1$ ) и сильных событий (серая кривая,  $N_2$ ). Черная полоса указывает время воздействия импульсов генератора ГЗ-33 (5В, 2кГц); в – длительность сигналов АЭ; г – энергия сигналов АЭ.

ствия. После чего активность АЭ возвращалась к фоновому уровню или (в некоторых случаях) оказывалась ниже среднего.

Также представляет интерес уточнение вопроса о пределах самоподобия в процессе деструкции среды при откликах на вибрационное воздействие. Для получения информации об этом была использована специальная методика – зарегистрированные сигналы АЭ разделялись по амplitудам. Для этого использовался вспомогательный программный дискриминатор с настраиваемым порогом, который задавался выше порога входного дискриминатора. Уровень вспомогательного дискриминатора выбирался таким образом, чтобы на интервале времени до воздействия (фоновый уровень активности всех сигналов) количество сигналов с амplitудами, превышающими порог и всеми остальными, было приблизительно одинаково. Сигналы АЭ с амplitудой, превышающей уровень дискриминации, считались “сильными”, а прочие зарегистрированные сигналы – “слабыми”. Таким

образом, в потоке сигналов были выделены две группы, для которых далее вычислялись временные зависимости, имеющие смысл активностей АЭ по выборкам сильных и слабых событий, или, другими словами, селективных активностей ( $N_1$  и  $N_2$ ).

Следует отметить, что зависимости активностей АЭ с сепарацией по амplitудам характеризуют важное свойство откликов на внешние воздействия – происходит или нет сокращение числа сильных событий при возрастании числа слабых. На проанализированных графиках общей активности АЭ [15] эта деталь была неразличима.

Пример влияния слабых вибраций на акустоэмиссионную активность образца гранита при нагрузке 67% от разрушения показан на рис. 2а. Отклик активности АЭ на вибровоздействие (с 0,4 до 1,2 1/с) обнаружился с задержкой примерно 1300 секунд после начала виброрезанса. Под влиянием вибраций активность АЭ возросла в три раза по сравнению с ее уровнем до ви-

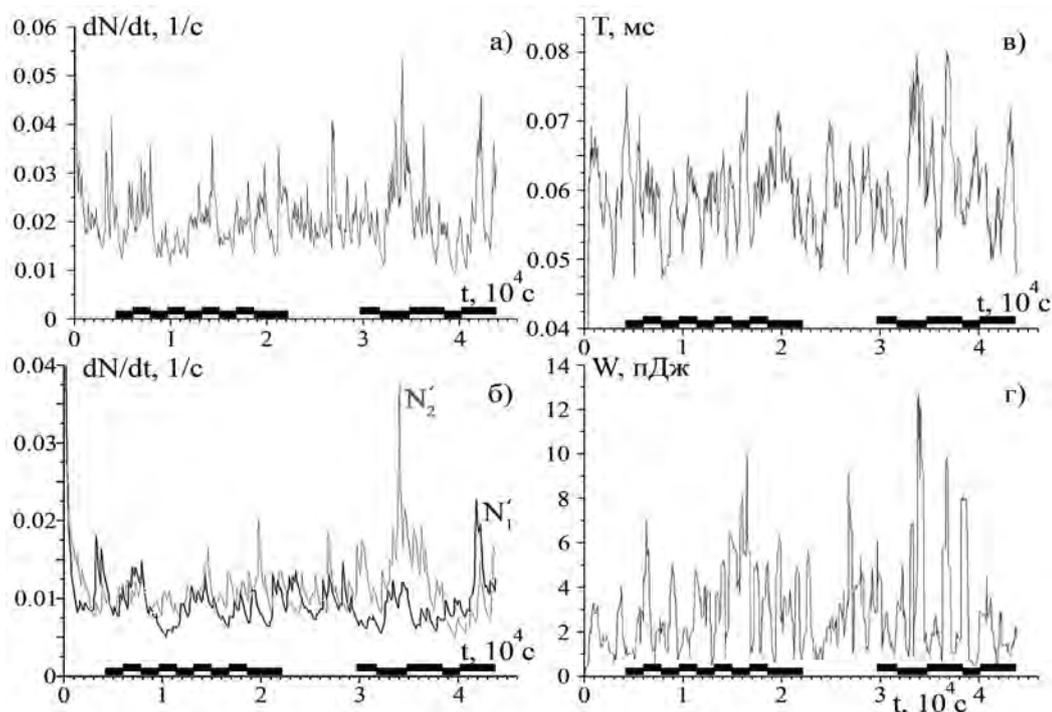


Рис. 3. Данные акустической эмиссии образца гранита Уэстерли: а – активность АЭ всех зарегистрированных в сессии событий; б – селективные активности АЭ, рассчитанные по выборкам событий с меньшей ( $N'_1$ ) и большей  $N'_2$  амплитудами,  $N'(t) = N'_1(t) + N'_2(t)$ ; в – длительность сигналов АЭ; г – энергия сигналов АЭ. Черные линии – периоды вибровоздействия при различных параметрах импульсов, первая серия вибраций – сканирование по амплитуде напряжения, вторая – по частоте.

бросанса (переход в активированное состояние отчетливо просматривается по рис. 2а), затем ее уровень оставался постоянным в течение 40 минут, после чего активность постепенно спадала до фонового уровня. Однако наряду со значительным приростом активности на графике следует также выделить тот самый интервал времени 1300 секунд с начала вибровоздействия. Видно, что произошла совсем небольшая, сравнимая с фоновым уровнем, активизация эмиссионного процесса. На этом же интервале времени длительность и энергия акустоэмиссионных сигналов одновременно с подачей воздействия возрастают и в момент прироста активности АЭ резко спадают до прежнего уровня (рис. 2в, г). Изменение длительности и энергии сигналов АЭ при почти не изменившемся уровне активности (до сильного прироста АЭ) говорит о чувствительности структуры образца к вибровоздействию.

При рассмотрении графиков селективных активностей больших и малых амплитуд следует обратить внимание на преимущественно

“рассогласованное” изменение обеих активностей на протяжении всей экспериментальной сессии (рис. 2б). Однако вибровоздействие инициировало в большей степени прирост сильных сигналов, нежели слабых, что в данном случае свидетельствует о большей чувствительности к вибрациям именно крупных дефектов.

В процессе испытаний было выявлено, что для данной серии образцов гранита Уэстерли средний уровень активности АЭ сохранялся квазистационарным в течение 6–8 часов. Длительность задержки активации АЭ этой серии образцов при данной нагрузке не превышала 25–30 минут. Используя эту информацию, была предпринята попытка сканирования частоты и амплитуды вибраций для выявления порога вибросensitivности материала образца. Сканирование по амплитуде проводилось на частоте 3 кГц, при этом амплитуда напряжения генератора ГЗ-33 дискретно изменялась в пределах от 1 до 5 В с шагом 0,5 В. Сканирование по частоте проводилось при постоянном напряжении

ГЗ-33, равном 5 В; вначале частота вибраций составляла 300 Гц, а затем она дискретно изменялась в пределах 500–2000 Гц с шагом 500 Гц. В ходе частотного сканирования были получены следующие результаты: наибольший отклик на воздействие проявился при частоте вибрации 500 Гц, а меньший отклик проявился при частоте вибраций 2000 Гц с запаздыванием отклика на смену режима вибровоздействия в обоих случаях примерно на 20 мин (рис. 3).

Анализ селективных кривых активностей сигналов малых и больших амплитуд образца гранита показал, что при увеличении мощности (звукового давления) вибровоздействия наблюдается постепенное рассогласование в ходе селективных кривых и небольшое увеличение количества сильных событий. При этом наибольший всплеск активности сильных событий зарегистрирован при амплитуде напряжения генератора 5 В. При сканировании по частоте отчетливо выявлены прирост активности крупноамплитудных событий на частоте вибраций 500 Гц и увеличение количества слабых сигналов на частоте 2 кГц. Увеличение частоты вибраций привело к приросту и длительности и энергии акустоэмиссионных сигналов, изменение мощности воздействия повлияло только на энергию сигналов.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили высокую чувствительность АЭ нагруженных образцов гранита к действию вибрационного поля. Показано, что при варьировании параметров внешнего воздействия видоизменяется характер реакции материала образца, т.е. параметры отклика АЭ. При определенных частотах и амплитудах источника вибрационного поля удается получить явно выраженный отклик АЭ на воздействие, который сопровождается перераспределением сигналов по амплитуде, длительности и энергии. При некоторых других параметрах вибровоздействий отклик получается мало контрастным, или же он вообще отсутствует. Это может свидетельствовать о необходимости дальнейших исследований для более детального анализа влияния вибраций на структурные изменения в образцах геоматериалов. При квазистационарном уровне активности АЭ в период задержки активации в начале сеанса вибровоздействия наблюдаются изменения параметров сигналов (длительности и энергии). По принципу причинности любой инструмент, воздействующий на среду, оставляет некий след в процессе ее преобразования. Примеры выполнения этого для откликов АЭ на вибровоздействие (рис. 2) могут считаться новыми аргументами, отражаю-

щими закономерный характер изменения режима АЭ (в дополнение к отмеченной ранее корреляции – приросту активности при вибровоздействиях с некоторой задержкой).

Авторы признательны В.В. Бобровскому и П.В. Ильичеву за помощь в написании статьи и подготовке программного обеспечения.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря поддержке по грантам РФФИ № 10-05-00231-а, 09-05-00687а.

#### Литература

1. Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц., Богомолов Л.М. Влияние слабых вибраций на деформирование горных пород при постоянной нагрузке // Вулканология и сейсмология. 2000. №2. С. 1–4.
2. Соболев М.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли. 1995. № 12. С. 72–78.
3. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 40. № 10. С. 1678–1689.
4. Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузибаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Физика Земли. 1991. № 12. С. 69–72.
5. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических вибраций на характер пластических деформаций материалов // Физика Земли. 1981. №6. С. 32–42.
6. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
7. Николаев А.В. Наведенная сейсмичность // Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под ред. Г.А. Соболева. М.: Крук, 2000. С. 139–164.
8. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. С. 101–119.
9. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. О структуре акустической эмиссии модельных образцов при внешнем энергетическом воздействии // Физика Земли. 2006. № 10. С. 36–42.

10. *Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // *Физика Земли*. 2006. №10. С. 43–50.
11. *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. Vol. 47. № 1. P.65–72.
12. *Науменко Б.Н.* Явление частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмами // *Физика Земли*. 1979. № 8. С.72–75.
13. *Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Наведенная сейсмичность и возможности контролируемой разрядки накопленных напряжений в земной коре // *Физика Земли*. 2009. № 10. С.49–68.
14. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. 2 изд. М.: Наука, 1982. 620 с.
15. *Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др.* Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 6. С. 22–33.