

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 530.34

ВИБРОУПРУГОСТЬ, АКУСТОПЛАСТИКА И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ НАГРУЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Л. М. Богомолов, Б. Ц. Манжиков, В. Н. Сычев, Ю. А. Трапезников, Г. Г. Щелочков

Научная станция Объединенного института высоких температур РАН, 720049, Бишкек, Киргизия

Излагаются результаты исследований по влиянию слабых низкочастотных вибраций на процесс деформирования горных пород при постоянной нагрузке. В экспериментах на одноосное нагружение гранитных образцов регистрировались деформационные характеристики, режим акустической эмиссии (АЭ) и форма отдельных импульсов АЭ. Выявлено наличие временной задержки между началом вибраций и последующим возрастанием активности АЭ, а также последствие вибраций при их выключении. Длительность задержки уменьшалась по мере возрастания нагрузки и сокращения перерыва между вибро сеансами. Установлен пороговый характер триггерного воздействия слабых вибраций на темп дилатационного деформирования горных пород.

Наблюдаемые эффекты рассматриваются в свете известных результатов по изучению виброупругости, акустической эмиссии нагруженных материалов. С позиций кинетической концепции прочности твердых тел и нелинейной акустики обсуждаются предлагаемая теоретическая модель явления и масштабные эффекты вибровоздействия на нагруженные геоматериалы.

Горная порода, вибрация, пластическая деформация, постоянная нагрузка, акустическая эмиссия, триггер, сейсмичность, масштабный эффект, кинетика, прочность, прерывистое скольжение (stick-slip).

VIBROELASTICITY, ACOUSTIC-PLASTIC EFFECT, AND ACOUSTIC EMISSION OF LOADED ROCKS

L. M. Bogomolov, B. Ts. Manzhikov, V. N. Sychev, Yu. A. Trapeznikov, and G. G. Shchelochkov

The effect of low-amplitude vibrations on the process of rock deformation at a constant load has been studied. Deformation characteristics, parameters of regime of acoustic emission (AE), and waveforms of isolated AE-pulses have been recorded during axial compression test of granite samples. A delay of AE activation after the start of vibration action as well as the aftereffect following the termination of vibration session have been revealed. The delay becomes shorter as the load enhances and the time interval between consecutive vibration sessions decreases. Triggering effect of weak vibrations on the rate of dilatation rock strain has been found.

The effects observed have been treated in the light of known results concerning vibroelasticity, acoustic-plastic effect, and acoustic emission of overburden solids. Suggested theoretical model of vibration action to loaded geomaterials and scaling effects are considered from the viewpoint of kinetic concept of solids strength and nonlinear acoustics.

Rock, vibration, plastic strain, constant load, acoustic emission, trigger, seismicity, scaling factor, kinetics, strength, stick-slip

ВВЕДЕНИЕ

Некоторые проявления геодинамических процессов в земной коре целесообразно моделировать в контролируемых лабораторных условиях. К подобным эффектам относится триггерное влияние вибраций на сейсмический режим. Исследование влияния вибраций на характер деформирования геоматериалов, начатое авторами работы [1], уже показало свою важность для понимания механизмов высвобождения накопленной в среде упругой энергии. Оказалось, что вибрации инициируют как субмикронные смещения, характерные для пластической деформации (согласно [1], она реализуется в виде неравномерного „скачкообразного“ течения, подобного ходу ползучести металлов при криогенных температурах), так и неустойчивые субмиллиметровые подвижки на границах несплошностей [2, 3]. Вибрации влияют не только на пластичность, но и на темп накопления (кинетику) структурных дефектов в гетерогенных средах, микротрещин, в частности, что проявляется как отмеченное в ряде работ [4—7] изменение активности акустической эмиссии под действием вибрационных полей. Отмечалось также влияние вибраций на электропроводность некоторых материалов и их акустическое сопротивление ультразвуковым волнам [8]. При интерпретации многочисленных проявлений виброэффектов удобно разделять случаи воздействия умерен-

ных вибраций (т. е. вибраций с амплитудой напряжения порядка процентов от средней нагрузки или соизмеримой с ней) и слабых вибраций с очень малыми амплитудами, на много порядков меньше среднего уровня напряжения. Эффекты умеренных вибраций уже исследованы детально, накоплены при этом результаты легли в основу многочисленных технологических приложений, как, например, виброперемешивание, виброразжижение, вибротранспорт и т. п. [9]. На геологические аспекты одного из виброэффектов — акустической флуидизации — указано в работе [10]. Исследование триггерного влияния умеренных вибраций на неустойчивую подвижку вдоль контактов блоков горных пород представлено в [3].

Данная работа посвящена исследованию слабых низкочастотных вибраций на деформирование и акустическую эмиссию образцов горных пород при сжимающих напряжениях порядка 10^2 МПа. Такой уровень напряжений характерен для глубин 10—30 км, типичных для гипоцентров землетрясений в Центральной Азии. Внимание обращено на то, что и очень слабые вибрации, амплитуда которых превышает некоторый порог, могут инициировать неупругие процессы в образцах горных пород. В случае слабых вибраций время задержки реакции среды оказалось неожиданно большим (10^2 — 10^4 с) по сравнению со случаем, изложенным в [2, 3]. Имеет место также и последствие слабых вибраций, аналогичное наблюдавшемуся [8] при ультразвуковом просвечивании материалов. Длительное время задержки реакции пород в начале вибрационного воздействия, а также последствие, отмечались в геофизических экспериментах со стандартными вибраторами [11, 12], продемонстрировавших принципиальную важность нелинейных эффектов для описания взаимодействия сейсмических волн с „активной“ геофизической средой (так называемая нелинейная сейсмика). Примечательно, что в экспериментах [11, 12] была обнаружена сейсмоакустическая эмиссия, возбужденная волнами от стандартных вибраторов.

Вопрос о влиянии микроколебаний на режим деформирования горных пород при лабораторных испытаниях органически связан с проблемой воздействия на ход сейсмического процесса вибраций, создаваемых естественными или искусственными источниками. Помимо уже упомянутого вибросейсмического эффекта [12] имеется множество других примеров триггерной сейсмичности. В их числе наблюдение наведенной сейсмичности при землетрясении Landers, 1992 г. [13], влияние мощных подземных взрывов на режим сейсмичности [14], влияние техногенных факторов на возникновение горных ударов и оползней [15] и т. п. Наиболее убедительным из подобных примеров является обнаруженная авторами работ [16, 17] взаимосвязь между характером высвобождения сейсмической энергии в районе плотины Нурекской ГЭС и амплитудой вибраций земной коры вследствие водосброса. Ниже будет показано, что имеется количественное соответствие между пороговой амплитудой вибраций в лабораторном эксперименте с нагруженными образцами гранита и критической амплитудой микроколебаний земной коры, радикально меняющей, согласно [17], локальный режим сейсмичности вокруг Нурекской плотины. Забегая вперед, отметим важное обстоятельство: численное значение пороговой амплитуды вибраций (0,2—1 мкм) согласуется с характерной величиной критического смещения D_c -параметра, фигурирующего во многих теориях неустойчивого прерывистого скольжения (stick-slip) [18].

На различных масштабных уровнях (от сантиметров до десятков километров) ползучесть горных пород при постоянном напряжении происходит за счет пластических эффектов, в частности дислокационных процессов и трещинообразования. Зарождение и развитие структурных дефектов такого рода сопровождается акустической эмиссией (АЭ), которая в лабораторных масштабах может рассматриваться в качестве аналога сейсмичности [19]. Влияние вибраций на акустическую эмиссию уже исследовано на бетонах [5], на составных образцах, реализующих модель stick-slip [3], и некоторых других материалах. Из-за технических сложностей менее изученными в этом отношении остаются горные породы. При лабораторном моделировании виброэффектов, в частности при исследовании АЭ, специалисты, работающие с разными материалами, нередко описывают результаты в различных терминах, что затрудняет их сопоставление друг с другом и с натурными геофизическими наблюдениями. До сих пор не проводился сравнительный анализ обнаруженного в [5] эффекта „виброупругости“ и акустопластического эффекта в поликристаллах [20—22], хотя и один, и другой реализуются при сходных физических условиях и могут рассматриваться как модель влияния сейсмических волн на коровые неупругие процессы. Выявить наиболее общие характеристики триггерного влияния микровибраций — одна из задач данной работы, другая — установить физическую причину удивительно высокой чувствительности неупругих процессов при дилатансионном деформировании горных пород к действию микровибраций. Выдвинутая в [23] гипотеза, которая связывает чувствительность режима деформирования горных пород к весьма слабым вибрациям с их блочным иерархически-неоднородным строением, способствует анализу этой проблемы. Согласно [23], само наличие неоднородностей, образующих иерархическую систему, определяет закономерности диссипации энергии в горных породах и динамику системы.

Отличительной особенностью наших экспериментов является сочетание большой длительности реологических испытаний (до месяца) с применением быстродействующей аппаратуры для ре-

гистрации акустической эмиссии (АЭ) и макродеформации нагруженных горных пород. Это позволяет обеспечить подобие как медленной фазы накопления энергии при деформировании образца, так и быстрой фазы энерговыделения (наблюдаемого как импульс АЭ) соответствующим фазам процессов в сейсмическом очаге.

ОБЗОР МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах проводилось одноосное нагружение гранитных образцов из месторождений Табылга и Каинда Киргизии. Образцы имели форму правильных цилиндров, диаметр которых был вдвое меньше высоты, а постоянство нагрузки на них в течение длительного времени обеспечивалось с помощью пружинной реологической приставки к стандартному гидравлическому прессу. Последний использовался для ступенчатого изменения нагрузки в ходе эксперимента и после фиксации нагрузки отключался, а дальнейшее нагружение обеспечивалось за счет упруго сжатых пружин приставки. Применение пружинной приставки исключало влияние шумов гидропривода пресса. Продолжительность выдержки образца при каждом уровне нагрузки определялась временем, необходимым для регистрации представительного количества событий АЭ. Ступенчатое нагружение продолжалось до разрушения образцов при нагрузке 11—12 т. Продолжался эксперимент в течение месяца. При этом обычное нагружение чередовалось с вибросеансами. Источником вибраций служил вентилятор с частотой вращения $\approx 40 \text{ с}^{-1}$, контактирующий с элементами пружинной приставки через демпфирующую прокладку. По нашим оценкам, амплитуда акустического давления в волнах от вентилятора не превышала 10 Па, т. е. всего $10^{-6} \%$ от среднего напряжения сжатия. В ходе эксперимента вентилятор включался на время (около 4 ч), в течение которого накапливались данные об АЭ образца в вибрационном поле.

Процесс деформирования образца контролировался по величинам сигналов главного сжимающего напряжения, продольной и поперечной деформации и параметрам акустической эмиссии. Для каждого события АЭ определялась амплитуда огибающей акустического сигнала, его длительность и временные интервалы между хронологически последовательными событиями. Для регистрации АЭ и деформационных сигналов использовался измерительно-вычислительный комплекс, включающий предусилители, аппаратуру КАМАК и компьютер. В течение опыта аппаратура работала в ждущем режиме; регистрировалась АЭ, амплитуда которой превышала порог дискриминации. Уровень вибраций от вентилятора был ниже порога дискриминации аппаратуры, что исключало возможность их регистрации как ложных событий АЭ. По ходу эксперимента часть событий АЭ регистрировалась при помощи быстродействующих АЦП с буферной памятью 4К. Это позволяло воспроизводить форму акселерограмм АЭ (в относительных единицах) в частотном диапазоне 10—500 кГц.

Действие вибраций на нагруженные образцы зависело от величины сжимающего напряжения. Ранее авторы работы [24] получили кривые деформирования образцов (σ — ϵ зависимости), аналогичные тем, что испытывались в присутствии вибраций. Из рис. 1, где приведены эти зависимости для продольной ϵ_1 и поперечной ϵ_2 деформаций, видно, что нагрузки, при которых удалось наблюдать эффекты слабых вибраций, соответствуют дилатансионной деформации. При этих значениях σ зависимость σ — ϵ_2 является нелинейной.

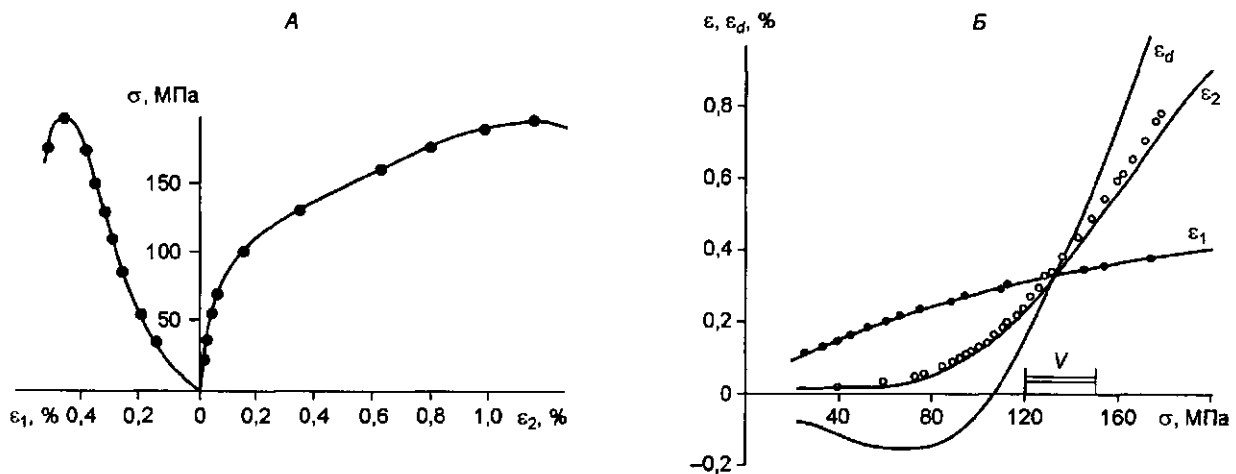


Рис. 1. σ — ϵ кривые деформирования образцов.

А — σ — ϵ зависимости для продольной (ϵ_1) и поперечной (ϵ_2) деформации при одноосном сжатии цилиндрического образца из гранита, согласно [24];

Б — зависимость дилатансии того же образца (ϵ_2) от напряжения сжатия и интервал нагрузок, при которых АЭ оказалась чувствительной к слабым низкочастотным вибрациям, обозначенным интервалом V .

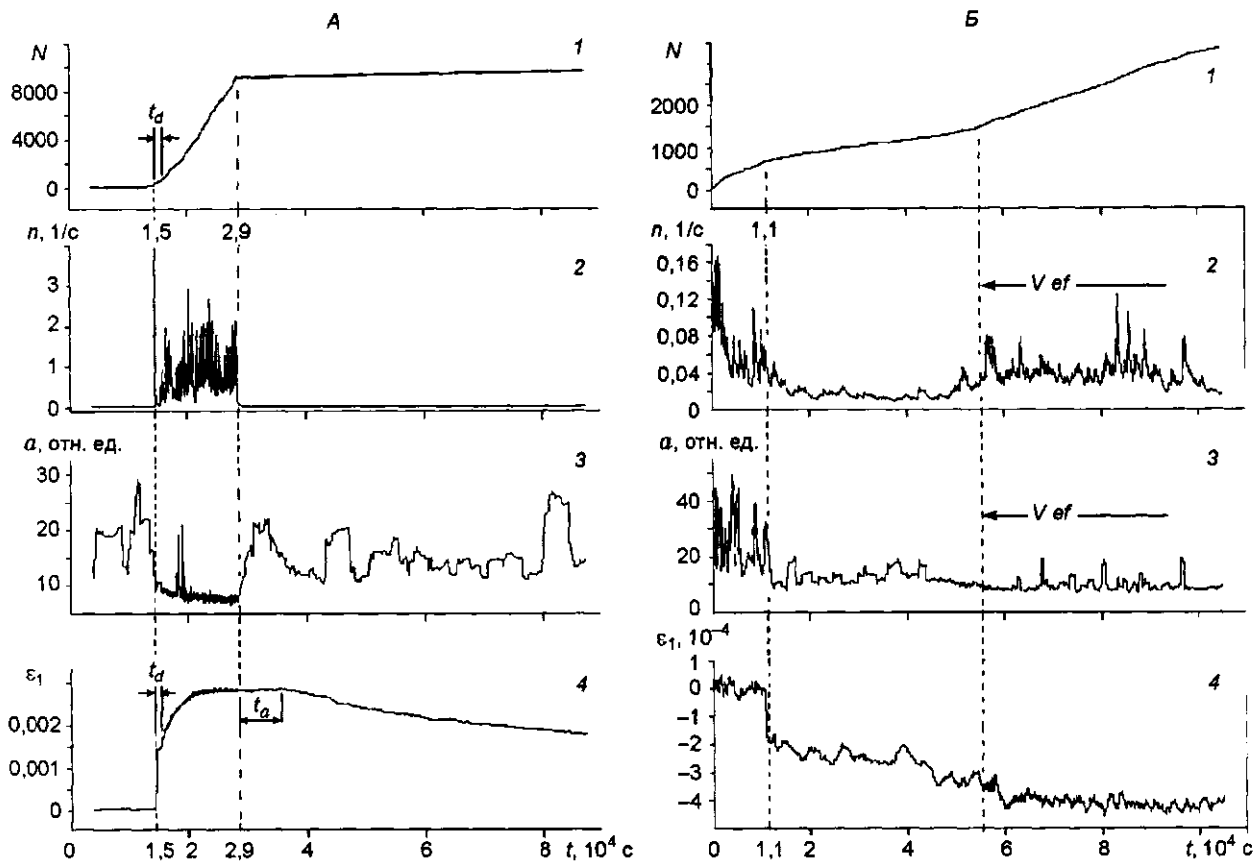


Рис. 2. Зависимости параметров АЭ и продольной деформации от времени.

А — ход накопления числа событий АЭ (1), активности АЭ (2), средней амплитуды сигналов АЭ (3) и продольной деформации образца (4) в течение последовательных сеансов: без вибраций (0—15 000 с), при наличии вибраций (15 000—29 000 с), без вибраций (29 000—88 000 с). Время задержки $t_d = 800$ с, последействия $t_a = 8000$ с. По графику деформаций (4) прослеживаются переходные процессы в интервалах 16 000—20 000 с, 37 000—65 000 с.
 Б — те же сигналы, что и в случае А, для сеанса без вибраций (0—11 000 с) и двух последовательных вибресеансов (11 000—105 000 с). V_{ef} — временной интервал, когда вибрационные эффекты проявлялись аналогично рассмотренным в [1]. Трехкратный рост средней активности АЭ после включения вибраций (2) характерен для проведенной серии испытаний.

На первом этапе исследований в 1997—1998 гг. были получены временные зависимости количества накопленных событий АЭ, активности АЭ и средней амплитуды событий, а также деформации образца (ϵ) в присутствии слабых низкочастотных вибраций. Примеры этих зависимостей представлены на рис. 2. Хорошо заметное на рисунках возрастание активности АЭ связано с триггерным влиянием вибраций. В экспериментах исключалось срабатывание аппаратуры непосредственно от вибраций и искажение статистики событий АЭ. На образцах, неподвергаемых действию вибраций, после загрузки наблюдалось монотонное снижение акустической активности.

Были также выявлены следующие особенности АЭ, связанные с действием вибраций: задержка активизации АЭ в начале вибресеанса, последействие по его окончании, снижение средней амплитуды АЭ и ее дисперсии во время вибресеанса. Длительность задержки варьировалась в широких пределах от 100 ч до $30 \cdot 10^3$ с. С возрастанием времени выдержки образца под нагрузкой и величины средней нагрузки время задержки отклика на вибровоздействие быстро уменьшалось. Длительность последействия была такого же порядка, что и время задержки. После включения вибраций переход в состояние с повышенной активностью АЭ и сниженной средней амплитудой иногда происходил как жесткая мода (см. рис. 2,А), иногда — как мягкая мода (см. рис. 2,Б). При жесткой моде активизации режима АЭ сначала регистрировались события с относительно большой амплитудой, затем устанавливалось насыщение активности АЭ на новом уровне и средняя амплитуда сигналов становилась меньше, чем была до включения вибраций. При мягкой моде снижение средней амплитуды АЭ происходило без эпизодического всплеска крупноамплитудных событий. Примерно в половине вибресеансов наблюдалось насыщение величины продольной деформации образца после ее интенсивного роста, начинавшегося синхронно с активизацией АЭ после задержки (см. рис. 2,А).

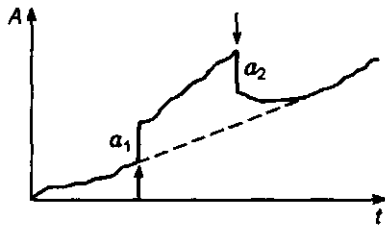


Рис. 3. График деформации образца под постоянной нагрузкой, из работы [5].

Стрелки — моменты включения (нижняя) и выключения (верхняя) вибратора. Дополнение к подписи из [5]: просматривается некоторое увеличение средней скорости деформации под влиянием вибраций и переходный процесс после их выключения. Скачки амплитуды деформации a_1 и a_2 могут быть следствием недостаточного временного разрешения, из-за чего задержка и последствие на данном рисунке не просматриваются. Согласно [5], $a(t)$ и t представлены в относительных единицах.

Сопоставление представленных рис. 2 со сходными по смыслу результатами [5, 17, 20—22] позволяет сделать следующее обобщение. Иницирующее влияние вибраций оказывается универсальным, в разных экспериментах на первый план выходят те или иные его проявления. Так, к примеру, при временах наблюдений, соответствующих начальному периоду активизации (после излома на ходе накопления событий, см. рис. 2,А), прослеживается аналогия наших результатов с нестационарным акустопластическим эффектом, который был исследован в поликристаллах металлов [20, 21]. Ход продольной деформации $\varepsilon(t)$ на рис. 2,А можно также интерпретировать как еще одно проявление эффекта виброупругости, обнаруженного К. М. Мирзоевым с соавторами в бетонах с мягкими включениями [5, 17]. Для удобства сопоставления результатов на рис. 3 воспроизведен, согласно [5], ход деформации образца при виброупругом эффекте. Этот результат сыграл в свое время важную роль в становлении идеи вибрационного воздействия на сейсмичность. Эксперименты, проведенные на образцах гранита, должны способствовать ее развитию на новом уровне понимания. Отметим, что эффект виброупругости [5] был обнаружен при сжимающих напряжениях значительно меньших, чем в наших экспериментах. По сравнению с графиком рис. 3, в нашем случае (см. рис. 2) переходные участки зависимости $\varepsilon(t)$, прирост до нового уровня насыщения и последствие значительно растянуты во времени. Важно, что времена задержки реакции на действие вибраций могут сильно различаться для разных материалов и условий нагружения. Для пластических материалов, исследованных в известной работе [1], они малы и почти незаметны. Для горных пород, где существенна роль трещинообразования, они довольно велики.

Наличие квазистационарного участка (насыщения) у зависимостей активности АЭ и продольной деформации (см. рис. 2,А) позволяет провести аналогию между известным явлением синхронного усиления (ослабления) сейсмичности по разным регионам [25] и обнаруженной бифуркацией (сменой режима) АЭ материала образца. Поскольку параметр подобия времен и линейных размеров $\sim 10^5$ — 10^6 , смене режима выделения энергии в образце за время порядка 10^3 с соответствуют изменения сейсмического режима на 10-летних масштабах времени.

Ввиду принципиальности вопроса о влиянии вибраций на амплитуду АЭ на следующем этапе исследований (1999—2000 гг.) было детально рассмотрено амплитудное распределение количества событий АЭ. Также рассматривались распределения чисел акустоэмиссионных событий в зависимости от длительности огибающей сигналов АЭ на пороге дискриминации и от величин временных интервалов между хронологически последовательными событиями АЭ. Эти распределения имеют смысл соответствующей плотности вероятности или спектра. На рис. 4 показаны соответственно спектры амплитуд и длительностей АЭ для трех случаев: сеанс без вибраций, сеанс с вибрацией от вентилятора и от работающего вхолостую гидропривода пресса. Как видим (см. рис. 4), спектры амплитуд и длительностей для этих сеансов являются одномодальными и различаются в основном по форме правых крыльев, описывающих распределения соответственно высокоамплитудных и наиболее длительных событий. В сеансе без вибраций спад правой части спектров амплитуд и длительностей более медленное, чем в вибросеансах. Этому соответствует существенно большая относительная доля высокоамплитудных событий в сеансе без вибраций по сравнению с вибросеансами. Как известно, амплитуда АЭ связана монотонно растущей зависимостью с размером образующегося дефекта. Следовательно, в присутствии вибраций дефектообразование происходит более мелкими порциями по сравнению с обычным режимом деформирования. Такой же вывод может быть сделан на основании спектров длительности АЭ. Происходящее за счет правых крыльев сужение спектров амплитуд и длительностей означает уменьшение дисперсии распределений этих величин в сеансах с вибрацией.

Наиболее наглядно влияние вибраций на режим АЭ проявляется в спектре временных интервалов между событиями (см. рис. 4,В). Для сеанса без вибраций характерно одномодальное распределение, близкое к пуассоновскому. Такой вид распределения наблюдается для простейших временных потоков случайных событий, которые являются стационарными, ординарными потоками без последствий. Вид распределений радикально изменяется во время вибросеанса, оно становится полимодальным. Если говорить о спектре, то он может быть охарактеризован как линейчатый. Наблюдается смещение основной моды распределения вправо, в сторону увеличения временного интервала и

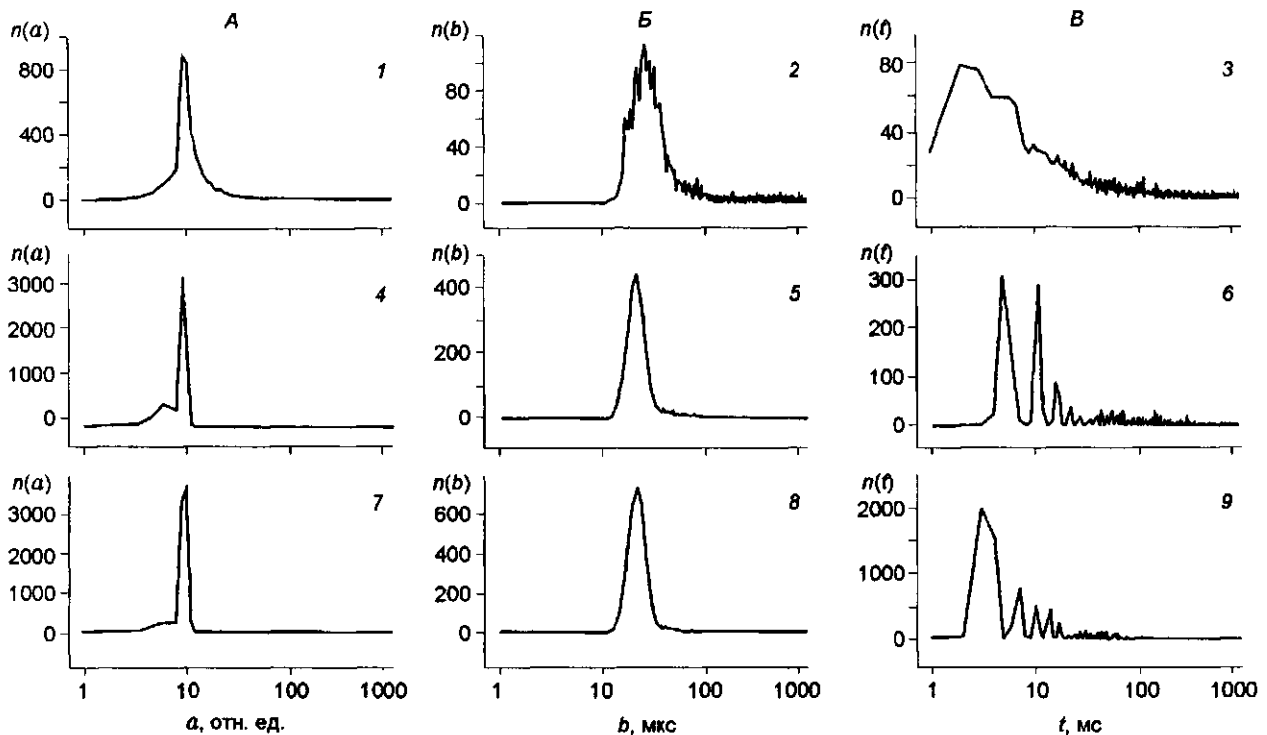


Рис. 4. Спектры амплитуд, длительностей и временных интервалов между событиями АЭ.

А — амплитудные распределения АЭ; Б — распределения сигналов АЭ по длительности; В — распределения временных интервалов между последовательными событиями АЭ. Распределения 1, 2, 3 соответствуют деформированию гранитного образца в отсутствие вибраций; 4, 5, 6 — с вибрацией от вентилятора; 7, 8, 9 — с вибрацией от гидропривода пресса.

появления мод с кратными значениями параметра 5; 10,5; 16... мс. Спектральные максимумы (моды) согласуются с частотой пульсаций воздушного потока, создаваемого 5-лопастным вентилятором. Пятикратная частота вращения вентилятора ~ 200 Гц как раз соответствует периоду основной моды (см. рис. 4, В). Для вибраций от пресса выделенные значения параметра: 3; 5; 7; 10... мс. Регулярный вид спектральных зависимостей для виброеансов свидетельствует об упорядоченном характере генерации АЭ. Такая упорядоченность, в совокупности с уменьшением дисперсии распределений амплитуд и длительностей АЭ, указывает на то, что процесс роста дефектов в вибрационном поле приобретает более детерминированный характер.

Изменения амплитудно-временных распределений АЭ в вибрационном поле отмечались, начиная с некоторого уровня амплитуды вибраций. При помощи быстрых АЦП с буферной памятью были получены акселерограммы низкочастотных (~ 200 Гц) вибраций от вентилятора. Анализ акселерограмм показал, что вибрации, дающие триггерный эффект, имеют амплитуду ускорения, сопоставимую с амплитудой слабых зарегистрированных событий АЭ. Пример акселерограммы АЭ и низкочастотных инициирующих вибраций приведен на рис. 5. В одном из сеансов амплитудой вибраций варьировали, устанавливая различные демпфирующие прокладки между вентилятором и приставкой. По грубым оценкам амплитуда вибраций A_V , способных к инициирующему влиянию на активность АЭ, составляет $A_V \geq 0,2 \pm 0,1$ мкм. Имеет ли это значение смысл порога по амплитуде или при меньших амплитудах время задержки отклика на вибрации столь велико, что превышает время эксперимента? Для ответа на этот вопрос пока недостаточно данных.

Используя качественную модель роста дефектов, подобную известной в сейсмологии модели К. Simazaki [26, 27], можно понять, каким образом более упорядоченный ход дефектообразования ведет к уменьшению средней амплитуды АЭ (свидетельство преимущественной генерации более мелких дефектов). Задолго до макроразрушения темп нарастания напряжения на структурных неоднородностях более или менее постоянный. При возникновении или приросте дефекта напряжение локально сбрасывается до уровня σ_0 , ниже которого дефектообразование невозможно. Чем чаще происходит разрядка, тем меньший избыток напряжений над уровнем σ_0 может накапливаться, и тем меньше высвобождение энергии при возникновении новых дефектов и т. д.

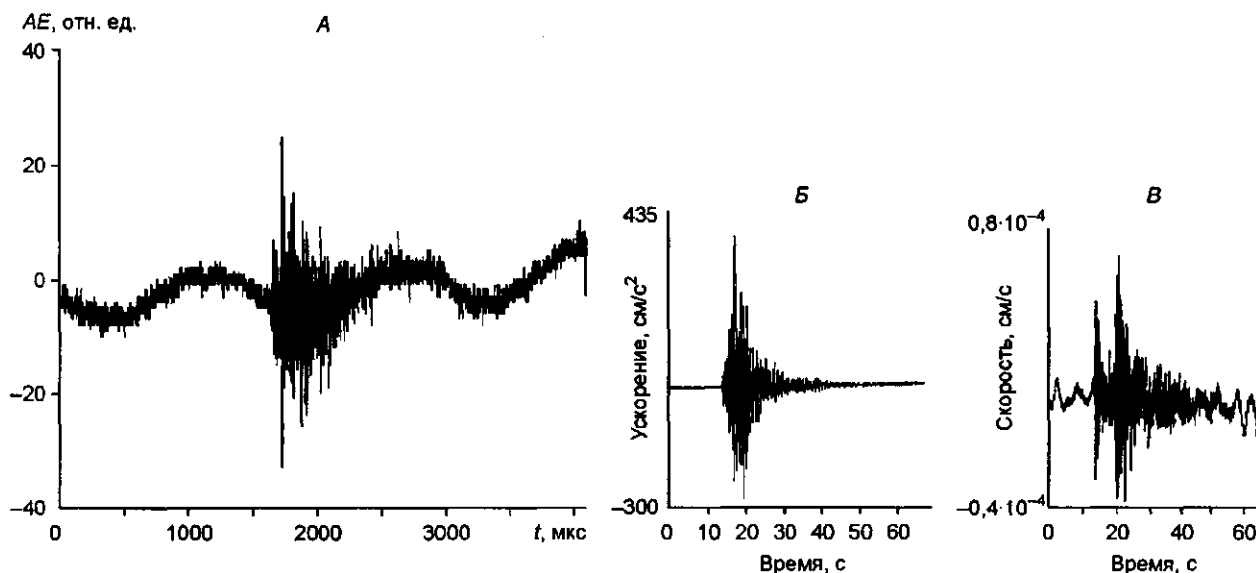


Рис. 5. Аналогия формы сигналов АЭ и сейсмограмм.

А — акселерограмма одного из самых слабых событий АЭ, зарегистрированных в течение сеанса с вибрациями при напряжении сжатия 100 МПа; Б — акселерограмма сильного землетрясения в Японии 25 июня 1977 г.; В — сейсмограмма (велосиграмм) слабого землетрясения в Киргизии 10 октября 1999 г. Показаны компоненты север—юг.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

С позиций кинетической теории прочности твердых тел [28—30] уменьшение числа высокоамплитудных событий в сеансах с вибрацией объясняется тем, что в присутствии вибраций релаксация неоднородных напряжений идет быстрее. Поясним это обстоятельство. Вероятность образования крупных дефектов описывается выражением

$$p \sim p_0 \exp(-U + \gamma\sigma)/kT = p_0 \exp(-U/kT + \Gamma\sigma_L/kT) = p_0 \exp(-u + g\sigma_L). \quad (1)$$

Здесь σ — усредненное главное напряжение, $\sigma_L = n_L\sigma$ — локальное напряжение, n_L — коэффициент перенапряжений. Параметры U , Γ — энергия активации и активационный объем определяют долговечность образца. Зависимость скорости пластической деформации $(\epsilon_p)_t$ от девиатора напряжений τ также может быть представлена в экспоненциальной форме, аналогичной (1), но со „своими“ кинетическими параметрами W , Λ : $(\epsilon_p)_t \sim \exp(-W + \Lambda\tau)/kT$. Предполагая линейную связь сдвигового напряжения τ и главного напряжения сжатия σ и переобозначая коэффициент перед τ , запишем выражение для $(\epsilon_p)_t$ в следующем виде:

$$(\epsilon_p)_t = (\epsilon_{p0})_t \exp[-W/kT + D(\sigma - \sigma_0)/kT] = (\epsilon_{p0})_t \exp[-w + \eta(\sigma - \sigma_0)], \quad (2)$$

где введено значение σ в начальный момент времени ($\sigma = \sigma_0$), что удобно для дальнейшего рассмотрения. В (1), (2) строчными буквами u , g , w , η обозначены соответственно отношения параметров U , Γ , W , D к абсолютной температуре kT .

В отсутствие вибраций А. Н. Ставрогиным было обнаружено, что для горных пород $(\epsilon_p)_t$ обратно пропорционально долговечности [30], т. е. $W \approx U$, $\Gamma n_L \approx D$. Это создавало впечатление о возможности интерпретации эффектов, связанных с дефектообразованием, через изменения единственного параметра Γ . Случай воздействия вибраций оказался более сложным. С одной стороны, скорость пластической деформации возрастает за счет увеличения D или предэкспонента в (2). Это влечет возрастание активности низкоамплитудных АЭ, источники которых, предположительно, сдвигового типа. С другой стороны, вибрации снижают вероятность высокоамплитудных событий АЭ, свидетельствующих о возникновении более крупных дефектов (предположительно трещин отрыва). Покажем, что с этими обобщениями экспериментальных данных согласуются решения уравнения, описывающего упруго-пластическое деформирование образца в поле вибраций.

Условие совместности суммарной упругой $\varepsilon_E = \sigma/E$ и пластической ε_p деформации с характеристиками нагружающего устройства приводит к нелинейному уравнению первого порядка для $\sigma(t)$

$$d\sigma/dt + M(\varepsilon_{p0})_t \exp[-w + \eta(\sigma - \sigma_0)] = M d\varepsilon_-/dt = M\delta\Omega \cos \Omega t. \quad (3)$$

В (3) $\varepsilon_- = \delta \sin \Omega t$ — вибрационная часть деформации, определяемая колебаниями поверхности образца внешним источником, $\delta = A/h$, A — амплитуда колебаний. Для упрощения принят синусоидальный закон вибраций. Параметр M , обратный модулю податливости, связан с жесткостью пружины κ и упругим модулем образца E соотношением

$$1/M = 1/E + S_0/\kappa h, \quad (4)$$

где h — высота образца, S_0 — площадь его поперечного сечения, κ — линейная жесткость пружины. Для используемой пружины $M \approx \kappa h/S_0$. В предельном случае жесткого нагружения $M \approx E$. Уравнение (3) с дополнительным слагаемым с правой части использовалось в работе [20] для анализа акустопластического эффекта (скачков деформаций) в случае испытаний с постоянной скоростью деформирования образца. В нашем случае решение уравнения (3) описывает не скачки между квазистационарными σ , а релаксацию напряжений под влиянием вибраций. Подстановкой $S(t) = \exp[w - \eta(\sigma - \sigma_0)]$ уравнение (3) сводится к линейному и допускает решение в квадратурах, которое записывается в виде:

$$\sigma = \sigma_i + M\delta \sin \Omega t - \eta^{-1} \ln \{1 + M\eta(\varepsilon_{p0})_t \exp[-w + \eta(\sigma_i - \sigma_0)] \int_0^t \exp(M\eta\delta \sin \Omega t) dt\}. \quad (5)$$

Используя свойство модифицированных функций Бесселя $I(z)$:

$$\exp(z \cos \theta) = I_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_k(z) \cos k\theta, \quad (6)$$

результат интегрирования (5) можно представить в форме:

$$\begin{aligned} \sigma = & \sigma_i + M\delta \sin \Omega t - \eta^{-1} \ln \{1 + M\eta(\varepsilon_{p0})_t \exp[-w + \eta(\sigma_i - \sigma_0)] \times \\ & \times [I_0(M\eta\delta)t + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} I_{2k-1}(M\eta\delta) (2k-1)^{-1} \Omega^{-1} \sin(2k-1)\Omega t + \\ & + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k I_{2k}(M\eta\delta) (2k\Omega)^{-1} (1 - \cos 2k\Omega t)]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

При больших t выражение (7) переходит в известный логарифмический закон релаксации напряжений [31], применимый не только для образца в целом, но и для отдельных неоднородностей внутри него. При этом коэффициент перед t в (7), имеющий смысл эффективной пластичности, возрастает в $I_0(M\eta\delta)$ раз. Время релаксации перенапряжений можно оценить как

$$t_\sigma \cong (\sigma_i - \sigma_0) / [M(\varepsilon_{p0})_t] \exp[w - \eta(\sigma_i - \sigma_0)], \quad (8)$$

фактически t_σ обратно пропорционально скорости ползучести. При малых временах выдержки в вибрационном поле (7) описывает генерацию высокочастотных гармоник σ , амплитуды которых убывают с ростом волнового числа k сравнительно медленно при условии $M\eta\delta \geq 1$. Это условие имеет смысл критерия эффективности влияния низкочастотных вибраций (с длиной волны намного превышающей размеры образца). Отметим, что в данной модели безразмерное число $z = M\eta\delta$ играет такую же роль, как акустическое число Рейнольдса в нелинейной сейсмике [11]. На очень больших временах относительный вклад кратных гармоник σ убывает как $1/t$. Возникновение высокочастотных гармоник поясняет, в какой-то степени, возможность влияния вибраций на процессы, идущие с участием структурных дефектов низших уровней масштабной иерархии (различные точечные дефекты, дислокации) [6]. Попутно под новым углом зрения просматривается различие импульсного и стационарного вибровоздействия на нагруженную среду. В обоих случаях должно иметь место стимулирование дефектообразования, начиная с уровня наименьших размеров. Однако усредненную по объему релаксацию напряжений следует ожидать лишь при длительном вибровоздействии. В [32] была высказана идея, что относительная доля гармоники σ с двойной частотой $\sim \cos(2\Omega t)$ может рассматриваться как прогностический признак микро- или макроразрушения. Легко видеть, что при небольших $z \leq 1$ отношение амплитуд гармоник σ с двойной и основной частотами выражается через

это число и начальную скорость пластической деформации $H_p = (\epsilon_{p0})_t \exp[-w + \eta(\sigma_i - \sigma_0)]$ формулой: $\sigma_{(2)}/\sigma_{(1)} = (H_p/\delta\Omega)I_2(z)$, т. е. оно сильно зависит от безразмерного параметра z (равного $M\eta\delta$).

Релаксация напряжений, согласно (1), снижает вероятность возникновения крупных дефектов типа разрушения неоднородностей. Индикатором этого процесса могут служить регистрируемые при жесткой моде (см. рис. 2,А) события АЭ с большой амплитудой. Подставляя в (1) логарифмический закон релаксации напряжений, из условия $\int_0^{t_r} p(\sigma_L)dt = 1$ можно получить следующее выражение для времени ожидания микроразрушения t_r :

$$t_r = \{[1 - \alpha t_0 M\eta H_p I_0(M\eta\delta)]^{-1/\alpha} - 1\} / (M\eta H_p I_0), \quad (9)$$

где $t_0 = (1/p_0) \exp(u - gn_L \sigma_i)$ — время ожидания при постоянном σ , см. (1); $\alpha = gn_L/\eta - 1 \approx n_L - 1$. В теоретически выделенном случае $n_L = 1$ (отсутствует неоднородность σ) первое слагаемое в фигурных скобках в (9) заменяется экспонентой: $\exp(\alpha t_0 M\eta H_p I_0)$. При малых значениях показателя экспоненты из (9) получается упрощенная формула для t_r , справедливая для любых коэффициентов n_L

$$t_r = t_0 [1 + (t_0/2)M\eta H_p I_0(M\eta\delta)]. \quad (10)$$

Естественно предположить, что при значительном превышении t_r над временем релаксации напряжений t_σ (8) воздействие вибраций проявится как мягкая мода (см. рис. 2,Б). При сопоставимых временах t_r и t_σ более вероятной становится жесткая мода виброэффектов (см. рис. 2,А).

Рассмотренная простейшая модель упругопластического деформирования поясняет (качественно) эффекты АЭ при нагружении горных пород в поле слабых вибраций. Из-за нехватки данных о значениях кинетических параметров w , η (которые могут отличаться от U/kT , γ/kT из выражения (1)) неясно, способна ли эта модель дать количественное соответствие результатов, в частности времен задержки и последствий.

Подходящий способ сравнения модели с экспериментальными данными может быть основан на вычислениях безразмерного числа $z = M\eta\delta$, пропорционального амплитуде вибраций. И при лабораторных испытаниях образцов, и при наблюдениях режима сейсмичности вблизи Нурекской плотины [16, 17] порогу триггерных вибрационных эффектов соответствовали субмикронные амплитуды $A_{\min} \leq 0,2-0,5$ мкм. Для эффективного влияния амплитуды вибрации должны быть в несколько раз больше пороговых, т. е. $A \sim 1$ мкм. Прикидка амплитуды A_z , соответствующей критерию $z = 1$, дает (при $M = 10^8$ Н/м², $\eta \sim \gamma/kT \approx 10^{-4}$ Дж/м³, т. е. $\gamma \approx 10^3$ молекулярных объемов $7 \times 7 \times 7 \text{ \AA}^3$) завышенное значение $A_z \sim 5-10$ мкм. Для улучшения соответствия простейшее реологическое уравнение (2) следует заменить более реалистичным, типа того, что предложено в [33] — реологическим соотношением „вязкоупругость с присоединением осцилляторами“. Это соотношение, в отличие от ряда других реологических уравнений, приспособлено для описания динамических эффектов. Автором работы [33] было показано, что наличие внутренних „присоединенных осцилляторов“ вызывает появление нелинейных резонансов особого рода — доминантных частот. Доминантные частоты раскачиваются легче, чем кратные гармоники в (7); первичным источником для них могут служить и низкочастотные вибрации, и высокочастотные колебания, генерируемые при образовании дефектов. Исследование этого вопроса — одна из задач нашей последующей работы.

ОБСУЖДЕНИЕ МАСШТАБНЫХ ЭФФЕКТОВ

К выводу о наличии характерной амплитуды вибраций-триггеров можно прийти и из модели прерывистого скольжения (stick-slip). Обсуждая возможность масштабирования виброэффектов, исследованных в лабораторных условиях, на эпицентральной шкале размеров, будем исходить из этой модели. Ее использование позволяет обойти трудности, связанные с дифракцией волн от реального вибратора (размеры которого малы по сравнению с масштабом десятков километров) и прочими эффектами трехмерности, ограничивающими применимость уравнений (3), (5). В современной версии модели stick-slip система уравнений, описывающих временную зависимость коэффициента трения на контакте блоков μ , скорости относительного проскальзывания V и параметра состояния поверхностей θ имеют форму [34]:

$$\mu = \mu_0 + a \ln V/V_0 + b \ln (V\theta/D_c), \quad (11)$$

$$d\theta/dt = 1 - V\theta/D_c, \quad (12)$$

$$d\mu/dt = -K(V - V_0 - V_-). \quad (13)$$

Здесь μ_0 , V_0 — значения μ , V при $t = 0$, рассматриваемые как фоновые; V_- — вклад источника вибраций, начинающего работу с этого момента; a , b — численные параметры; D_c — критическое смещение; K — коэффициент жесткости, определяющий энергообмен с основной средой. В (12) в качестве закона изменения времени подобного параметра θ , описывающего эволюцию контактирующих поверхностей, выбрано уравнение Диетриха [34—36]. Оно разрешимо в квадратурах относительно θ при любых скоростях $V(t)$. Рассмотрим отклик скорости проскальзывания на синусоидальное внешнее воздействие $V_- = V_e \cos \Omega t$, полагая $V = V_0 + v$, $v \ll V_0$. Благодаря линейности уравнения (12) по θ систему (11)—(13) можно свести к следующему нелинейному уравнению для параметра $\xi = \int_0^t v dt$ — смещения за вычетом стационарного сноса $V_0 t$:

$$d^2\xi/dt^2 + d\xi/dt [d\xi/dt (KD_c - b) - d\xi/dt KD_c + b(V_0)^{-a/b} |d\xi/dt|^{1+a/b} \exp K(\xi - \xi_-)/b] / (aD_c) = 0, \quad (14)$$

где $\xi_- = A_e \sin \Omega t$ — возмущение от внешнего источника.

Сама форма уравнения (14) с экспоненциальной зависимостью от ξ (подобной случаю „лазерных“ сред) указывает на возможность эффектов самоорганизации. Влияние вибраций на коэффициент трения μ вследствие нелинейности (см. ниже) является простейшим из таких эффектов. В линейном приближении (14) сводится к уравнению вынужденных колебаний осциллятора с собственной частотой ω и декрементом (инкрементом) β , равными

$$\omega = V_0 [K/(aD_c)]^{1/2}; \quad \beta = V_0 (KD_c + a - b) / (2aD_c). \quad (15)$$

Принимая для численной оценки $V_0 \cong 3$ см/год, $D_c \cong 0,1-1$ см, а значения параметров K , a , b — такие же, как и в [7, 34], получим $\beta \leq \omega \sim 10^{-5}-10^{-6}$ 1/с, что значительно меньше частоты внешних возмущений Ω . Роль внешней силы играет слагаемое $KA_e [-\Omega \cos \Omega t + (V_0/D_c) \sin \Omega t] / a$, пропорциональное жесткости нагружения и амплитуде вибратора. В то время как условие перехода от неустойчивости ($\beta < 0$) отмечалось во многих работах, посвященных модели stick-slip [27, 34], эффекты вынужденных колебаний в рамках этой модели еще не анализировались.

Устойчивый ($\beta > 0$) и неустойчивый случаи требуют отдельного рассмотрения. При $\beta > 0$ уравнение (14) в квадратичном по ξ приближении дает усредненное смещение $\langle \xi_2 \rangle$ (детекторный эффект), которое определяет, согласно (13), изменение коэффициента трения: $\Delta\mu = -K \langle \xi_2 \rangle$. В пределе $\Omega \gg \omega$ получается простое выражение $\langle \xi_2 \rangle = KA_e^2 (1 - 0,5a/b) / a$. Уменьшение коэффициента трения согласуется с результатами лабораторных испытаний образцов в присутствии вибраций [6]. Таким образом, разность коэффициентов μ в различных режимах на контактирующих блоках и минимальная амплитуда вибраций, приводящая к бифуркации (смене режима), связаны соотношением

$$(A_e)_{\min} = 2K^{-1} a \Delta\mu^{1/2}; \quad (a \sim b). \quad (16)$$

Время перехода порядка $1/\beta$ из формулы (15).

В случае неустойчивости решение (14) получено лишь для околороговых инкрементов ($|\beta| \ll \omega$). В кубическом приближении по амплитуде колебаний получены поправки к инкременту и частоте. Из них следует (выкладки опущены), что рост неустойчивости останавливается, когда амплитуда колебаний достигает уровня $(A_e)_{st} = 2aK^{-1}(b/a - KD_c/a)^{1/2}$. Для обращения инкремента в нуль β не имеет значения, за счет чего достигнут уровень $(A_e)_{st}$: из-за внешних воздействий или вследствие „внутренней“ неустойчивости.

Предварительный вывод о наличии пороговой амплитуды вибраций, способных оказывать триггерное влияние на ход деформирования горных пород и, как следствие, на сейсмичность, был сделан Ю. А. Трапезниковым в 1997 г. Был предсказан, как наиболее вероятный, микронный диапазон пороговых амплитуд. Эту работу авторы посвящают его памяти.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, что даже весьма слабые вибрации оказывают существенное влияние на ход деформационного процесса и акустическую эмиссию горных пород. Иницирующее действие вибраций проявляется с задержкой во времени и имеет кумулятивный характер. Отмечено последствие вибраций. Важными для

дальнейших работ представляются наблюдения более упорядоченного (по сравнению со случаем отсутствия вибраций) характера акустической эмиссии, сопровождающей процессы деформирования в образце. Результаты теоретического анализа нерезонансных вибрационных эффектов согласуются, в основных чертах, с экспериментами и не чувствительны к специфике рассматриваемых моделей. Для интерпретации результатов предложен подход, соединяющий кинетическую концепцию прочности твердых тел и методы нелинейной акустики (сейсмоки). Этот подход позволяет с единых позиций рассматривать различные формы эффекта виброупругости, акусто-пластического и вибросейсмического эффектов как проявления общих свойств нелинейного взаимодействия вибраций со средой при разных условиях испытаний и пространственных масштабах.

В прикладном плане работа ориентирована на проблему воздействия на режим сейсмичности с целью предотвращения сильных землетрясений. Вибрационное воздействие может быть перспективным либо как инструмент для контроля сейсмичности, либо как новое средство прогноза землетрясений. Реальность этих перспектив подтверждают совместные исследования на образцах, проведенные на Научной станции ОИВТРАН и в Институте физики и механики горных пород НАН Киргизии. Для дальнейшего продвижения к решению проблемы необходим крупномасштабный геофизический эксперимент, который возможен лишь при многостороннем научно-техническом сотрудничестве. МНИЦ-ГП предоставляет для этого широкие возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Соболев Г. А., Пономарев А. В., Кольцов А. В. Возбуждение колебаний в модели сейсмического источника // Физика Земли, 1995, № 12, с. 72—78.
3. Соболев Г. А., Шпетцлер Х., Кольцов А. В., Челидзе Т. Л. Иницирование неустойчивой подвижки в лабораторных экспериментах // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. Вып. 1. М., 1993, с. 38—47.
4. Соболев Г. А., Пономарев А. В., Кольцов А. В. и др. Возбуждение акустической эмиссии упругими импульсами // Интернет-сайт Геофизической обсерватории „Борок“, http://www.brk.adm.yar.ru/russian/1_512/text/impdor.htm
5. Мирзоев К. М., Виноградов С. Д., Рузибаев З. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Физика Земли, 1991, № 12, с. 69—72.
6. Трапезников Ю. А., Богомоллов Л. М., Манжиков Б. Ц. О природе скачкообразной реакции нагруженных образцов на действие микроколебаний // Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика. Алма-Ата, 1997, с. 167—172.
7. Richardson E., Marone Ch. Effects of normal force vibrations on frictional healing // J. Geophys. Res., 1999, v. 104, № 12, p. 28859—28878.
8. Шамина О. Г., Паленов А. М., Стопинский З. и др. Влияние ультразвуковых вибраций на физико-механические свойства горных пород // Физика Земли, 1990, № 8, с. 93—101.
9. Блехман П. И. Вибрационная механика. М., Физ.-мат. лит-ра, 1994, 400 с.
10. Melosh H. J. Acoustic fluidization: A new geologic process? // J. Geophys. Res., 1979, v. 87, p. 7513—7520.
11. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмоки. М., Наука, 1987, 288 с.
12. Береснев И. А. Сейсмическая эмиссия, наведенная вибровоздействием // Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. Т. 2. Методика и результаты геодинамического мониторинга природно-технических объектов. М., 1993, с. 80—84.
13. Hill D. P., Jonston M. J. S., Langbein J. O., Bilham P. Response of Long Valley caldera to the $M_w = 7,3$ Landers, California, Earthquake // J. Geophys. Res., 1995, v. 100, № B7, p. 12 985—13 005.
14. Тарасов Н. Т., Тарасова Н. В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Докл. РАН, Геофизика, 1995, т. 343, № 4, с. 543—546.
15. Николаев Н. И. Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М., Наука, 1977, 198 с.
16. 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.
17. Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х. Влияние механических вибраций на выделение сейсмической энергии // Прогноз землетрясений. № 4. Душанбе; Москва, Дониш, 1983, с. 365—372.

18. Marone Ch., Kilgore B. Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones // *Nature*, 1993, v. 362, p. 618—621.
19. Виноградов С. Д., Мирзоев К. М., Саломов Н. Г. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов. Душанбе, Дониш, 1975, 114 с.
20. Козлов А. В., Мордюк С. И., Селицер С. И. Акустопластический эффект при активной деформации кристалла // *ФТТ*, 1996, т. 28, № 6, с. 1818—1823.
21. Сапожников К. В., Кустов С. Б. Акустопластический эффект в кристаллах алюминия на разных стадиях деформирования // *ФТТ*, 1997, т. 39, № 10, с. 1794—1800.
22. Малыгин Г. А. Акустопластический эффект и механизм суперпозиции напряжений // *ФТТ*, 2000, т. 42, № 1, с. 69—75.
23. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987, 100 с.
24. Манжигов Б. Ц., Мансуров В. А., Куксенко В. С., Савельев В. Н. Связь между накоплением микротрещин и макродеформацией при одноосном сжатии горных пород // *Физика и механика разрушения горных пород*. Фрунзе, Илим, 1983, с. 77—84.
25. Вольхин А. М., Брагин В. Д., Зубович А. В. и др. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М., Наука, 1993, 158 с.
26. Simazaki K. A model of earthquake recurrence and its application to crustal movement in Tokai district, Japan // In Report, Tokai Division, Coordinating Com. Earthquake Prediction. Tokyo. Geographical Survey Institute, 1977, p. 32—40.
27. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.
28. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // *Вестн. АН СССР*, 1968, № 3, с. 46—56.
29. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // *Физика Земли*, 1977, № 6, с. 11—16.
30. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М., Недра, 1985, 271 с.
31. Шпейзман В. В., Степанов В. А., Жога Л. В. Хрупкое разрушение твердых тел при статическом и циклическом нагружении // *Проблемы прочности и пластичности твердых тел*. Л., Наука, 1979, с. 43—55.
32. Соболев Г. А. Перспективы международного сотрудничества в прогнозе землетрясений // *Прогноз землетрясений и глубинная геодинамика*. Алма-Ата, 1997, с. 106—122.
33. Николаевский В. Н. Теория нелинейных волн и характеристики сейсмических сигналов // *Нелинейные волновые процессы*. М., Мир, 1987, с. 273—295.
34. Marone Ch. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1998, v. 26, p. 643—696.
35. Dieterich J. H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.*, 1979, v. 84, p. 2161—2168.
36. Dieterich J. H. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, p. 2601—2618.

*Поступила в редакцию
28 ноября 2000 г.*