АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 3, с. 383–390

УДК 541

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ РАЗРУШЕНИЯ КАК ПРИЧИНА ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2005 г. А. В. Лавров

Московский государственный горный университет
119 991 Москва, Ленинский проспект 6.Тел.: (095) 236 95 93
E-mail: avlavrov@mail.ru

Поступила в редакцию 7.10.03 г.

Изменение пространственного распределения источников акустической эмиссии при деформировании и разрушении образцов материалов и горных пород сопровождается изменением амплитудного распределения принимаемых сигналов вследствие геометрического расхождения фронта упругих волн. Амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии принято характеризовать b-параметром (наклоном дифференциального амплитудного распределения). Локализация источников может приводить к уменьшению b-параметра, обычно интерпретируемому как предвестниковый признак макроразрушения. Корректная интерпретация снижения b-параметра возможна лишь в случае, если выполняется локация источников и вводится поправка на геометрическое расхождение и затухание упругих волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии

Деформирование и разрушение горных пород и материалов сопровождается мобилизацией дефектов различных типов и размеров. Одним из проявлений процесса дефектообразования является акустическая эмиссия (АЭ), т.е. излучение упругих волн вследствие необратимых или частично обратимых структурных изменений. В качестве механизмов АЭ могут выступать, к примеру, двойникование, выход дислокаций или их скоплений на границы минеральных зерен, рост микро- и макротрещин, схлопывание пор и др. [1–7].

Современная регистрирующая аппаратура обеспечивает измерение как параметров отдельных сигналов АЭ (время прихода, амплитуда, длительность, спектр), так и параметров потока АЭ (количество сигналов в единицу времени, длительность временнóго промежутка между сигналами и др.). При использовании нескольких приемных каналов возможна локация источника АЭ, т.е. определение координат дефекта, породившего данный сигнал. Для локации на плоскости необходимо как минимум три канала, для локации в пространстве – четыре. Значительная стоимость АЭ-канала, включающего в себя приемный преобразователь, предусилитель, фильтры и аналого-цифровой преобразователь, вынуждает при экспериментальных исследованиях АЭ ограничиваться имеющимся количеством каналов, которое отнюдь не всегда обеспечивает локацию. Измерения АЭ как в лаборатории, так и в натурных условиях зачастую выполняются с использованием одноканальной аппаратуры (см., например, [8]).

Распределение принятых сигналов АЭ по амплитуде и его изменение в процессе нагружения характеризует развитие процесса разрушения во времени. Так, амплитудный анализ позволяет выявлять характерные этапы разрушения горных пород и, в частности, переход разрушения с одного иерархического уровня на другой [9].

Амплитудное распределение сигналов АЭ обычно представляют в логарифмических координатах. По оси абсцисс откладывают логарифм амплитуды или амплитуду в децибелах, по оси ординат – логарифм числа событий с амплитудой, большей данной, указанной по оси абсцисс. Получаемый таким образом график условимся называть кумулятивным. В случае, если по оси ординат откладывется логарифм числа событий с амплитудой в данном диапазоне, будем называть график дифференциальным. Пример кумулятивного амплитудного распределения сигналов АЭ, полученного при диаметральном сжатии дискообразного образца криноидного известняка, показан на рис. 1 [10]. Пороговый уровень регистрации в опыте был выбран равным 40 дБ, выше уровня лабораторных и аппаратурных шумов.

Кумулятивный график на рис. 1 может быть аппроксимирован прямой линией:

$$\lg N = a - b\lg A, \qquad (1)$$

где A – амплитуда в вольтах; N – число сигналов с амплитудой, большей A. b-параметр, фигурирую-

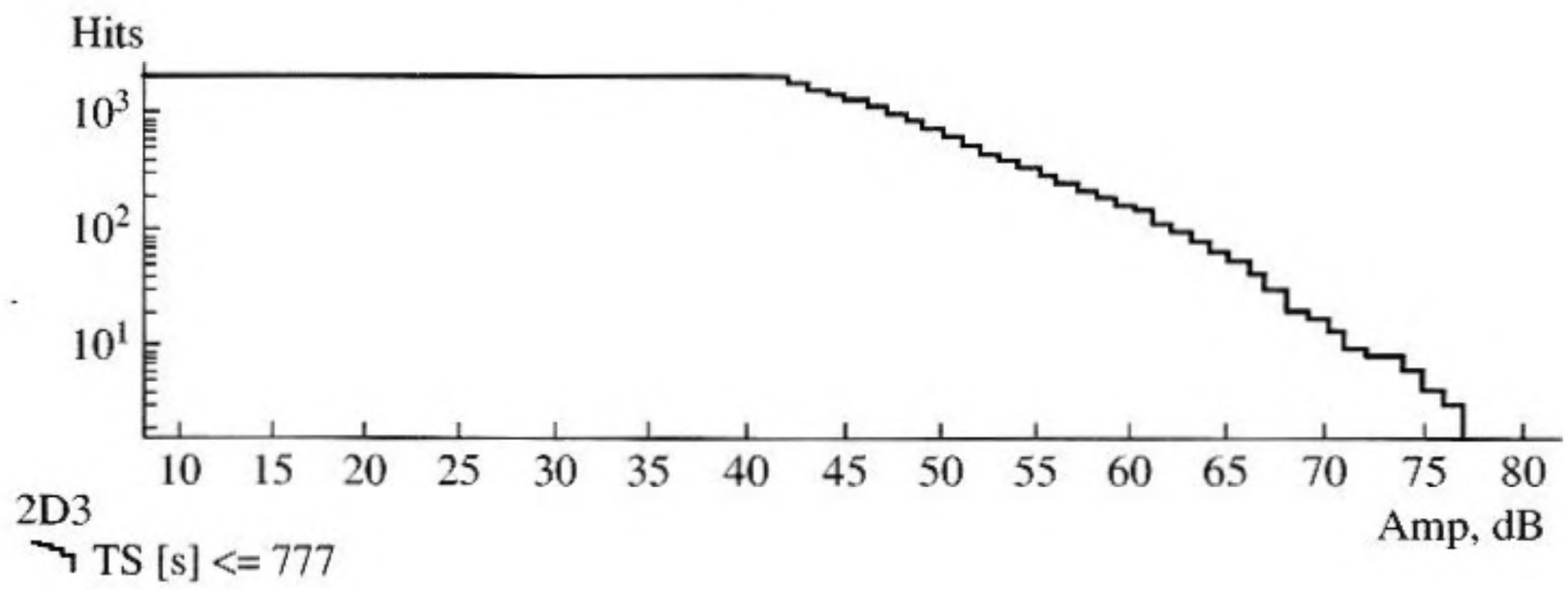

Рис. 1. Кумулятивное амплитудное распределение сигналов АЭ в опыте по диаметральному сжатию дискообразного образца известняка [10].

щий в выражении (1), характеризует угол наклона амплитудного распределения. На рис. 1 $b = 1.33$.

Выражение (1) совпадает по форме с законом Гутенберга-Рихтера, известным из сейсмологии. Закон Гутенберга-Рихтера обычно рассматривают как свидетельство самоподобия процесса разрушения геологической среды. Ключевую роль распределение (1) играет при обосновании концепции самоорганизованной критичности применительно к физике землетрясений [11, 12].

Дифференциальное амплитудное распределение, соответствующее (1), описывается выражением [13]:

$$n(A)dA = kA^{-m}dA, \qquad (2)$$

где $n(A)dA$ – число сигналов с амплитудой в диапазоне от A до $(A + dA)$. Безразмерный показатель m характеризует наклон дифференциального амплитудного распределения. Сопоставление (1) и (2) показывает, что

$$b = m - 1. \qquad (3)$$

Часто форма дифференциального логарифмического распределения отличается от линейной, описываемой выражением (2). Отклонение кривой при малых значениях $\lg A$ (вблизи порога измерения АЭ) обусловлено неполной регистрацией АЭ. Отклонение кривой в правой части обусловлено малой статистикой высокоаплитудных событий [9, 13]. Оценку значения m-параметра обычно выполняют на основе обработки центральной, линейной части графика.

Идеальной линейной форме амплитудного распределения, описываемой выражениями (1) и (2), соответствует линейная форма энергетического распределения в логарифмических координатах, $\lg n = f(\lg E)$, где E – энергия принятого сигнала АЭ. Отклонения амплитудного распределения в крайней левой и крайней правой частях обусловливают аналогичные отклонения от линейности энергетического распределения. При этом реальная форма энергетического распределения может быть аппроксимирована выражением [14]:

$$n(E)dE = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}}\frac{1}{E}\exp[-(\ln E - k)^2/(2d^2)], \qquad (4)$$

где d и k – постоянные.

Эксперименты показывают, что значения b-параметра зависят от типа горной породы, а также от условий эксперимента. В процессе нагружения породного образца часто наблюдается снижение b-параметра при приближении к макроразрушению. Например, в процессе нагружения образца долерита b-параметр уменьшился с 0.3–0.9 в начале опыта до 0.0–0.3 при приближении к пределу прочности [13]. Снижение b-параметра при приближении к пределу прочности рассматривается обычно как возможный предвестник макроразрушения. Действительно, снижение b-параметра означает относительное увеличение доли высокоамплитудных событий в общем потоке АЭ. Высокоамплитудные сигналы АЭ порождаются крупными трещинами, в связи с чем снижение b-параметра может рассматриваться как результат слияния трещин, формирования трещин более высокого ранга, переход процесса разрушения на более высокий иерархический уровень с последующим макроразрушением.

Настоящее исследование демонстрирует, что снижение b-параметра может быть вызвано не укрупнением дефектов, генерирующих АЭ, а их пространственной локализацией. Если измерение амплитуды сигналов проводится без поправки на расхождение фронта волны, то локализация разрушения приводит к снижению b-параметра, весьма сходному с наблюдаемым в экспериментах. Подобная принципиальная ошибка в обработке и интерпретации данных измерений АЭ в опытах по деформированию горных пород имеет место во всех случаях, когда невозможна локация источника (например, при использовании АЭ-аппаратуры с числом каналов менее четырех).

1.2. Влияние затухания упругих волн на амплитудное распределение сигналов АЭ

Унандер [15] теоретически показал, что затухание упругих волн при распространении от источника (дефекта) до приемника АЭ оказывет влияние на амплитудное распределение сигналов АЭ. Им было рассмотрено равномерное распределение источников в полушаре, в центре которого расположен приемник АЭ. Было рассчитано амплитудное распределение принятых сигналов в случае, когда все источники излучают с одинаковой интенсивностью. Оказалось, что амплитудное распределение принятых сигналов в этом случае отличается от линейного, а b-параметр зависит от амплитуды, изменяясь в пределах от 0.0 до 3.0. Был проанализировал случай неравномерного распределения источников по интенсивности и показано, что и в этом случае b-параметр зависит от амплитуды и лежит в пределах от 0.0 до 3.0 [15].

На амплитудное распределение принятых сигналов и значения b-параметра оказывает влияние как интенсивность источников, так и величина коэффициента затухания. Показано, что увеличение коэффициента затухания приводит к сдвигу амплитудного распределения вправо, т.е. к уменьшению b. Аналогичное снижение b-параметра наблюдается, если увеличивается интенсивность источников, при условии, что коэффициент затухания отличен от нуля (т.е. наряду с геометрическим расхождением имеют место диссипативные потери) [15]. Таким образом, Унандер показал, что снижение b-параметра может быть обусловлено как увеличением энергии событий, так и ростом коэффициента затухания упругих волн, вызванным увеличением дефектности образца при приближении к разрушению.

Вайсс [16] подтвердил выводы работы [15], используя иной теоретический метод. Им было показано, что при условии равенства амплитуд излучаемых сигналов и при отсутствии затухания кумулятивное распределение принятых сигналов в логарифмических координатах имеет вид прямой линии с наклоном $b = 3.0$. Коэффициент затухания, отличный от нуля, обусловливает нелинейность распределения. Как и Унандер, Вайсс рассматривал только распределение источников в шаре радиусом R, с приемником АЭ, расположенным в его центре.

1.3. Локализация разрушения

Исследования влияния расхождения фронта и затухания упругих волн на регистрируемое амплитудное распределение сигналов АЭ выполнялись в работах [15, 16] для одной пространственной конфигурации источников: равномерное распределение в шаре, с приемником АЭ в центре шара. В реальных опытах источники могут быть распределены по объему образца неравномерно, т.е. локализованы. Локализация источников АЭ обусловлена различными причинами. Определенную роль играет начальная неоднородность породы, неравномерное распределение относительно более слабых элементов, наличие слоистости, трещин и т.п. Например, эксперименты [17], проводившиеся с локацией источников АЭ с помощью 8-канальной аппаратуры, показали, что при одноосном нагружении слоистого песчаника формируется зона локализации разрушения уже на начальных стадиях нагружения (при напряжениях, меньших $0.3\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности горной породы на одноосное сжатие). Эта зона субпараллельна слоистости, которая, в свою очередь, была перпендикулярна направлению нагружения.

Наряду с локализацией, обусловленной начальной неоднородностью породы, наблюдается локализация разрушения в макротрещины на заключительной стадии деформирования. Так, в работе [18] образцы гранита и песчаника нагружали в режиме трехосного осесимметричного сжатия при постоянном боковом давлении 50 МПа. АЭ измеряли с помощью шестиканальной системы, обеспечивавшей возможность трехмерной локации источников. Опыты проводились в режиме, обеспечивающем обратную связь по активности АЭ. Это позволяло растянуть во времени стадию разрушения образца в районе предела прочности, а также в запредельной области.

В граните, представлявшем собой относительно однородную мелкозернистую породу, переход от рассеянного микротрещинообразования к локализации источников в макроразрыв происходил внезапно, после прохождения пикового значения осевого напряжения.

Длительность промежутка времени между прохождением пикового напряжения и формированием макроразрыва составляла несколько десятых долей секунды. b-параметр оставался примерно постоянным и равным ≈ 3.0 до предела прочности. На пределе прочности, за несколько десятых долей секунды до формирования макроразрыва, начиналось снижение b-параметра. К моменту формирования макротрещины b-параметр снижался до 1.0–1.5. Фрактальная размерность D пространственного распределения источников в том же образце не обнаруживала подобного предвестникового изменения, оставаясь равной ≈ 2.7 вплоть до зарождения макроразрыва, когда D падала до 1.7–1.8 [18]. В другом гранитном образце не отмечалось предвестникового снижения b-параметра.

В песчанике, характеризовавшемся относительно высокой неоднородностью, картина локализации выглядела несколько иначе [18]. Класте-

ризация источников АЭ имела место задолго до достижения пикового значения напряжения, аналогично результатам опытов в работе [17]. С момента достижения пика напряжения наблюдалось постепенное снижение b-параметра, с 3.0–3.5 до ≈2.5. Формирование макроразрыва сопровождалось дальнейшим, более быстрым, падением b-параметра с 2.5 до 1.5–2.0. Постепенное снижение b-параметра в песчанике сопровождалось постепенным снижением фрактальной размерности пространственного распределения источников, с $D \approx 2.5$ на пике напряжения до $D \approx 1.5$ на момент формирования макроразрыва [18].

Подробное исследование локализации разрушения и микроструктуры полос сдвига было выполнено в работе [19]. Авторы [19] отмечают, что начало неоднородного деформирования относится к допредельной стадии, а окончательное оформление полос сдвига – к запредельной. Количество полос сдвига зависит от бокового давления σ_3 и увеличивается с ростом σ_3. Полосы сдвига были отчетливо видны по окончании опыта, после изъятия образцов из камеры.

Подводя итог краткому обзору экспериментальных исследований процесса локализации разрушения при деформировании образцов горных пород, необходимо отметить следующее. Формированию макроразрывов предшествует стадия пространственной кластеризации дефектов, выявляемая как с помощью локации источников АЭ, так и по данным измерения деформаций. Равномерное распределение дефектов по объему образца сменяется более сложным распределением, в котором отчетливо выявляются кластеры неправильной формы, напоминающие, как правило, полудиски, диски, эллипсоиды и т.п. Как показано в следующем разделе статьи, подобная качественная перестройка распределения источников АЭ в объеме образца может приводить к изменениям b-параметра амплитудного распределения принятых сигналов, если при его расчете не учитывается расположение источников.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ b-ПАРАМЕТРА, ВЫЗВАННЫХ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ РАЗРУШЕНИЯ

В настоящей работе количественно исследовано влияние геометрического расхождения фронта упругих волн на амплитудное распределение принимаемых сигналов АЭ. Затухание отсутствует и отражение на границах образца не рассматривается. Амплитуды всех излучаемых сигналов одинаковы. Амплитуды принятых сигналов равны $A = 1/r$, где r – расстояние от источника АЭ до приемника.

2.1. Равномерное распределение источников в объеме призматического образца

Вначале рассмотрим случай равномерного распределения 10^5 источников в объеме образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с отношением высоты к стороне основания 2 : 1 (основание имеет форму квадрата). Данный случай является базовым и представляет распределение источников, характерное для начальной стадии нагружения призматического образца. Приемник АЭ расположен в центре боковой грани образца. Амплитудное распределение принятых сигналов АЭ для данной конфигурации показано на рис. 2а. По оси абсцисс откладывается десятичный логарифм амплитуды принятого сигнала, $\lg A$. Значения $\lg A$ разбиты на 10 категорий, рассчитано количество принятых сигналов в каждой категории, и это количество отложено по оси ординат в логарифмическом масштабе (логарифм имеет основание 10). Можно показать, что наклон полученной таким образом гистограммы равен b. На рис. 2а $b = 3.0$. Значение $b = 3.0$ хорошо согласуется со значениями, получаемыми в опытах [18].

Обращает на себя внимание выполаживание гистограммы в крайней правой и крайней левой частях на рис. 2а. Это напоминает реальные экспериментальные наблюдения.

2.2. Локализация разрушения в полосе сдвига

На рис. 3а показана ситуация, когда в образце сформировалась зона локализации разрушения в виде наклонной полосы сдвига, а приемник АЭ находится на пересечении этой зоны с боковой гранью образца. Угол наклона зоны локализации к оси обрзца 45°. Отношение высоты образца к длине стороны основания равно 2 : 1. Толщина зоны локализации составляет 1/20 длины основания образца, что соответствует результатам экспериментов [19]. 10^5 источников равномерно распределены в объеме зоны локализации.

Амплитудное распределение принятых сигналов АЭ показано на рис. 2б. Наклон гистограммы в центральной ее части дает значение b-параметра, равное 2.0. В левой и правой частях наблюдаются отклонения от линейности. Значение $b = 2.0$ характерно для равномерного распределения источников на плоскости (при условии, что приемник сам расположен в той же плоскости). Таким образом, переход от распределения источников в объеме образца к распределению в пределах узкой полосы локализации, проходящей через местоположение приемника АЭ, сопровождается снижением b-параметра с 3.0 до 2.0. Это снижение вызвано изменением только геометрии зоны раз-

рушения, а не амплитудного распределения источников.

Еще более драматические изменения амплитудного распределения принятых сигналов имеют место, если приемник расположен не на пересечении зоны локализации с боковой поверхностью образца, а в центре боковой грани (рис. 3б). Зона локализации проходит через центр образца, под углом 45° к его продольной оси, и имеет толщину, равную 1/20 длины стороны основания образца. Отношение высоты образца к ребру основания составляет, как и прежде, 2 : 1.

Амплитудное распределение, отвечающее конфигурации рис. 3б, показано на рис. 2в. Распределение на рис. 2в отличается сильной нелинейностью. При этом, за исключением крайней правой его части, наклон распределения отвечает значениям $b < 2.0$. В центральной части распределения имеются участки с $b = 0.0$ и даже $b < 0.0$.

В реальных образцах часто образуется несколько зон локализации. Это должно приводить к еще более сложным амплитудным распределениям принятых сигналов АЭ и к снижению значений b по сравнению со стадией рассеянного накопления микротрещин (ср. рис. 2а и 2в).

2.3. Локализация источников в шаре

Опыты по деформированию образцов, проводившиеся с локацией источников, показывают, что в силу неоднородности породы может уже на ранних стадиях наблюдаться локализация с образованием кластеров неправильной, часто изометричной, формы (разд. 1.3). Не ставя целью имитацию кластеров реальной геометрии, рассмотрим амплитудное распределение принятых сигналов, генерируемых источниками, равномерно распределенными в шаре, при различном положении приемника относительно центра этого шара. Радиус шара R равен 1.0, общее число источников – 10^6. При расположении приемника в центре шара амплитудное распределение принятых сигналов оказывается линейным, с $b = 3.0$. Этот результат совпадает со значением b-параметра, полученным для аналогичной конфигурации в работах [15, 16].

При расположении приемника на границе шара (т.е. на расстоянии 1.0 от его центра) распределение принятых сигналов остается линейным в большей своей части, обнаруживая некоторое выполаживание в крайней левой и крайней правой частях (рис. 4а). Значение b-параметра, характеризующее наклон распределения в центральной его части, равно 3.0.

При расположении приемника вне области кластеризации, на расстоянии от центра, равном удвоенному радиусу шара, распределение становится нелинейным, с отрицательным наклоном

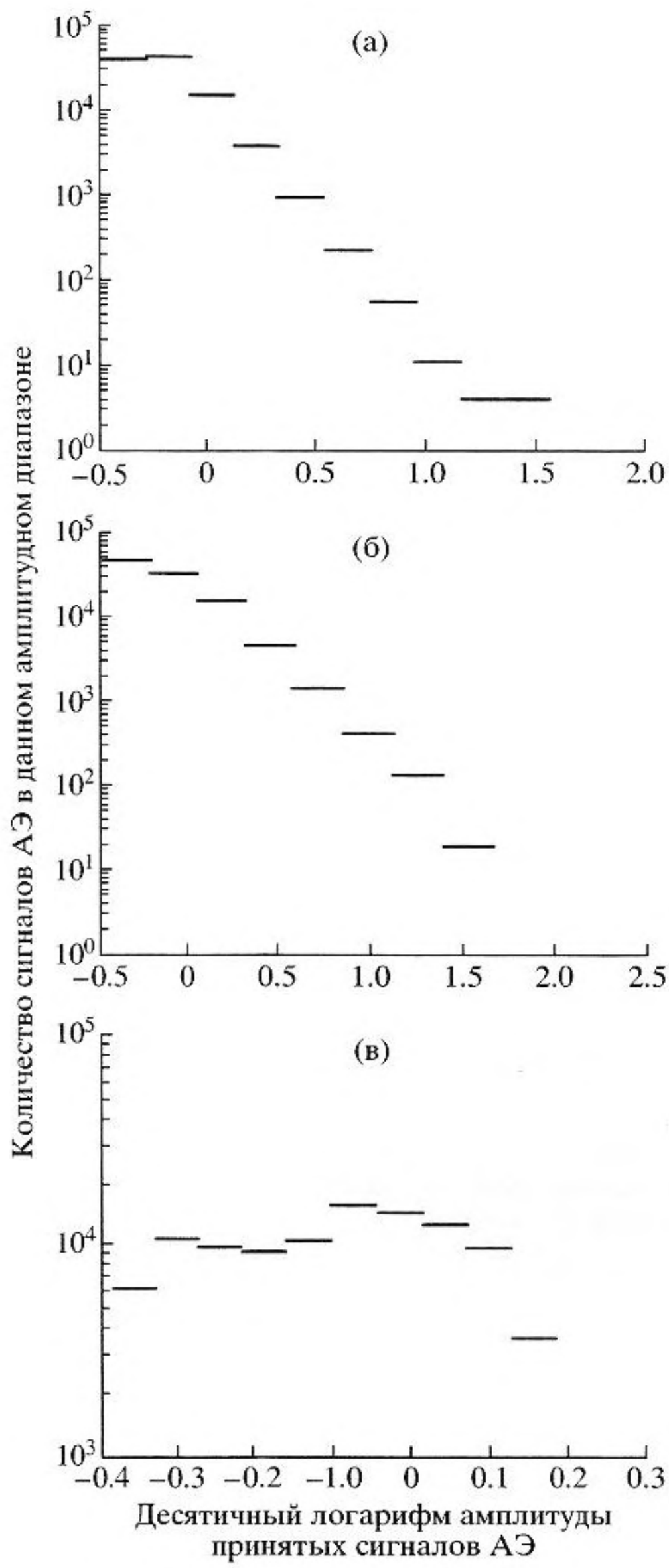

Рис. 2. Результаты моделирования распределения амплитуд принятых сигналов АЭ: *а* – базовый случай (источники равномерно распределены в объеме образца); *б* – локализация источников в полосе сдвига; приемник АЭ расположен на пересечении полосы сдвига и боковой поверхности образца; *в* – локализация источников в полосе сдвига; приемник АЭ расположен в центре боковой грани образца.

($b < 0.0$) в крайней левой части. Отметим, что в реальных экспериментах регистрируют только сигналы АЭ с амплитудой, превышающей некоторое пороговое значение. В связи с этим участок с отрицательным наклоном, характерный для ма-

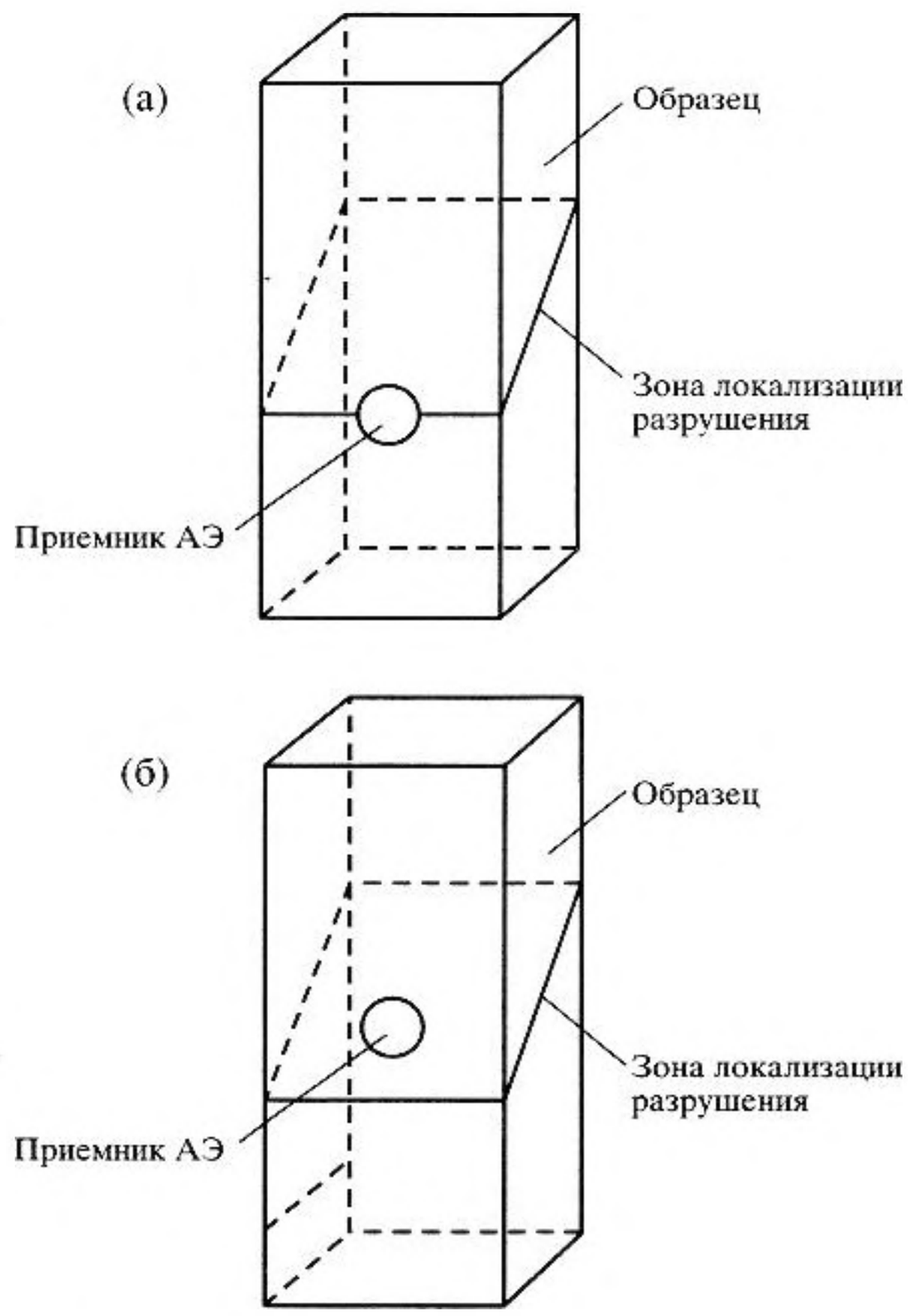

Рис. 3. Образец горной породы с установленным на нем приемником АЭ.

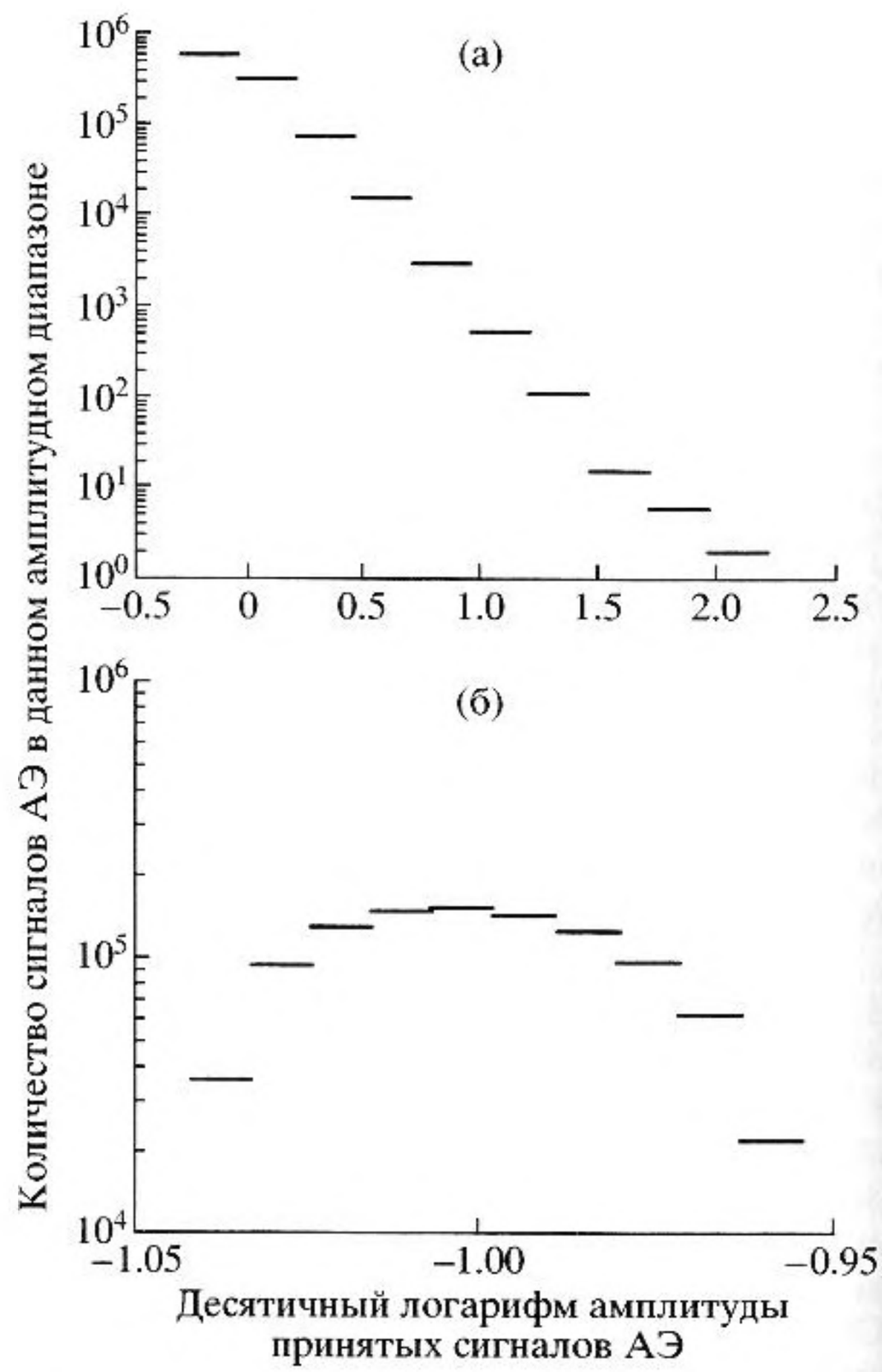

Рис. 4. Результаты моделирования распределения амплитуд принятых сигналов АЭ в случае локализации источников в шаре: *а* – приемник АЭ расположен на границе шара; *б* – приемник АЭ расположен на расстоянии $10R$ от центра шара.

лых амплитуд, может отсутствовать. В некоторых экспериментах (например, [13]) отмечались значения $b < 0.0$.

Дальнейшее удаление приемника от центра шара приводит к тому, что левая часть распределения с наклоном $b < 0.0$ становится еще более выраженной, а распределение принимает практически симметричный вид. В качестве примера на рис. 4б показано амплитудное распределение для случая с расположением приемника на расстоянии $10R$ от центра шара.

Для сравнения рассмотрим случай кластеризации источников в кубе с ребром 2.0. При расположении приемника на расстоянии 10.0 от центра куба на перпендикуляре к грани куба, восстановленном в ее центре, амплитудное распределение практически равномерно, с $b = 0.0$. Аналогичная картина имеет место и при расположении приемника на расстоянии 100.0 от центра куба. Моделирование для случая расположения приемника в центре куба привело к линейному распределению с $b = 3.0$, с небольшим выполаживанием в крайней правой и крайней левой частях, аналогично показанному на рис. 4а. Это еще раз показывает, что кластеризация может приводить к снижению b-параметра с 3.0 до 0.0, обусловленному исключительно геометрическим расхождением фронта упругой волны, а не изменением амплитудного распределения излучаемых сигналов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Локализация разрушения в плоскостях сдвига приводит к изменению амплитудного распределения принятых сигналов АЭ и b-параметра, вызванному расхождением упругих волн при их распространении от источника до приемника АЭ. Изменение геометрии зоны разрушения с трехмерной (равномерное распределение источников в обьеме) на двумерную (полоса сдвига с приемником, расположенным в ее плоскости) сопровождается уменьшением b с 3.0 до 2.0. В реальных экспериментах это снижение может быть ошибочно интерпретировано как свидетельствующее об изменении энергетического распределения источников, т.е. об увеличении относительной доли более высокоэнергетических событий. Такие изменения обычно рассматривают как предвестник

макроразрушения. В известном смысле, снижение b, вызванное локализацией, может рассматриваться как предвестник, поскольку оно свидетельствует о перегруппировке микротрещин перед формированием макроразрыва.

Локализация разрушения в трехмерные кластеры (шар, куб) искажает амплитудное распределение, приводит к его нелинейности, снижая b-параметр вплоть до 0.0 и даже до отрицательных значений. Расхождение упругих волн обусловливает выполаживание амплитудного распределения принятых сигналов в крайней левой и крайней правой его частях, что соответствует реальным наблюдениям.

Результаты исследования показывают, что экспериментальные измерения амплитудного распределения сигналов АЭ, выполненные без поправки на уменьшение амплитуды, вызванное расхождением фронта волны ($1/r$), нельзя считать корректными. В частности, некорректными следует считать все измерения b-параметра, выполненные одно-, двух- или трехканальными АЭ-системами. Построение корректных амплитудных распределений требует локации источников и введения поправки на расхождение фронта волны, а также на затухание. Пример корректного измерения амплитудных спектров АЭ с поправкой на ослабление амплитуды упругих волн в процессе распространения содержится, например, в работе [20], где исследованы закономерности разрушения древесных и стекловолоконных композитов при механическом нагружении.

При проведении измерений одним приемником можно корректно измерять распределение интервалов времени между последовательными принятыми сигналами АЭ. Указанные интервалы, по крайней мере в некоторых случаях, распределены по закону степенно́го скейлинга, как и амплитуды. Такие измерения были выполнены, например, в работе [8]. Кроме того, качественные изменения характера процесса разрушения сопровождаются изменениями частотных спектров АЭ. Последние позволяют получить информацию о параметрах растущих трещин [21]. Эффективным способом исследования сигналов АЭ, все более практикуемым в последние годы, является вейвлет-анализ [22, 23].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01–05–64105) и программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ–1467.2003.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грешников В.А., Дробот Ю.В.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. М.: Изд. Стандартов, 1976. 272 с.
2. *Lockner D.* The role of acoustic emission in the study of rock fracture // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1993. V. 30. № 7. P. 883–899.
3. *Вознесенский А.С., Демчишин Ю.В., Шафаренко Е.М., Оксенкруг Е.С., Тавостин М.Н., Филимонов Ю.Л.* Распознавание стадий деформирования соли по параметрам сигналов акустической эмиссии. В сб. тр. X сессии Российского акустического общества. Том 2. М.: ГЕОС, 2000.
4. *Lei X., Masuda K., Nishizawa O., Jouniaux L., Liu L., Ma W., Satoh T., Kusunose K.* Detailed analysis of acoustic emission activity during catastropjic fracture of faults in rock. Journal of Structural Geology. 2004. V. 26. № 2. P. 247–258.
5. *Робсман В.А.* Трансформации акустических спектров в неоднородных твердых средах при нелинейной деформации // Акуст. журн. 1992. Т. 38. Вып. 1. С.129–143.
6. *Ржевский В.В., Ямщиков В.С., Шкуратник В.В. и др.* Эмиссионные эффекты "памяти" в горных породах. // Доклады АН СССР. 1983. Т. 273. № 5. С. 1094–1097.
7. *Куксенко В.С., Инжеваткин И.Е., Манжиков Б.Ц. и др.* Физические и методические основы прогнозирования горных ударов. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 1987. № 1.
8. *Diodati P., Bak P., Marchesoni F.* Acoustic emission at the Stromboli volcano: scaling laws and seismic activity // Earth Planet. Sci. Letts. 2000. V. 182. P. 253–258.
9. *Томилин Н.Г., Куксенко В.С.* Иерархическая модель разрушения горных пород. В сб.: Науки о Земле: Физика и механика геоматериалов / Сост. А.В. Лавров. М.: Вузовская книга, 2002. С. 116–135.
10. *Лавров А.В.* Акустическая эмиссия при испытаниях скальных горных пород "бразильским" методом. В сб. тр. XI сессии Российского акустического общества. Том 2. М.: ГЕОС, 2001. С. 99–102.
11. *Bak P., Tang C.* Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. // J. Geoph. Res. 1989. V. 94. № B11. P. 15635–15637.
12. *Ito K., Matsuzaki M.* Earthquakes as self-organized critical phenomena // J. Geoph. Res. 1990. V. 95. № B5. P. 6853–6860.
13. *Fonseka G.M., Murrell S.A.F., Barnes P.* Scanning electron microscope and acoustic emission studies of crack development in rocks // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1985. V. 22. № 5. P. 273–289.
14. *Rudajev V., Vilhelm J., Kozák J., Lokajiček T.* Statistical precursors of instability of loaded rock samples based on acoustic emission // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1996. V. 33. № 7. P. 743–748.
15. *Unander T.E.* The effect of attenuation on b-values in acoustic emission measurements – a theoretical approach // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1993. V. 30. № 7. P. 947–950.
16. *Weiss J.* The role of attenuation on acoustic emission amplitude distributions and b-values // Bull. Seism. Soc. Am. 1997. V. 87. № 5. P. 1362–1367.
17. *Seto M., Utagawa M., Katsuyama K.* The relation between the variation of AE hypocenters and the Kaiser ef-

fect of Shirahama sandstone. In.: Proc. 8th Int. Congr. Rock Mechanics. Ed.: T. Fujii. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995. V. 1. P. 201–205.

18. *Lockner D.A., Byerlee J.D.* Precursory AE patterns leading to rock fracture. In: Proc. 5th Conf. on AE / MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1995. P. 45–58.
19. *Bésuelle P., Desrues J., Raynaud S.* Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2000. V. 37. № 8. P. 1223–1237.
20. *Guarino A., Garcimartín A., Ciliberto S.* An experimental test of the critical behaviour of fracture precursors // Eur. Phys. J. Ser. B: Condensed Matter, 1998. V. 6. № 1. P. 13–24.
21. *Крылов В.В., Ланда П.С., Робсман В.А.* Модель развития акустической эмиссии как хаотизация переходных процессов в связанных нелинейных осцилляторах // Акуст. журн. 1993. Т. 39. Вып. 1. С. 108–122.
22. *Grosse C.U., Finck F., Kurz J.H., Reinhardt H.W.* Improvements of AE technique using wavelet algorithms, coherence functions and automatic data analysis. Construction and Building Materials. 2004. V. 18. P. 203–213.
23. *Lavrov A., Wevers M., Vervoort A.* Acoustic emission during monotonic and cyclic deformation of a brittle limestone // Journal of Acoustic Emission. 2002. V. 20. P. 292–299.

Fracture Localization in Space as a Cause of Variations in the Amplitude Distribution of Acoustic Emission Signals

A. V. Lavrov

Moscow State Mining University,
Leninskiĭ pr. 6, Moscow, 119991 Russia
e-mail: avlavrov@mail.ru

Abstract—The change in the spatial distribution of acoustic emission sources in the course of the deformation and fracture of samples of materials and rocks is accompanied by changes in the amplitude distribution of the received signals because of the geometric spread of the elastic wave front. It is customary to characterize the amplitude distributions of acoustic emission signals in terms of the *b*-value (the slope of the differential amplitude distribution). In particular, the localization of the sources may cause a decrease in the *b*-value, which is usually interpreted as a precursor of macrofracture. A correct interpretation of the decrease in the *b*-value is only possible if the location of the sources in space is accomplished and a correction for the spread and attenuation of elastic waves is introduced.