

УДК 539.42

Е.Е. Дамаскинская, А.Г. Кадомцев

ДАМАСКИНСКАЯ ЕКАТЕРИНА ЕВГЕНЬЕВНА – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики прочности (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН). E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 26.

КАДОМЦЕВ АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ – доктор физико-математических наук, заведующей лабораторией физики прочности (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН).

E-mail: Andrej.Kadomtsev@mail.ioffe.ru

194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 26.

Физические признаки стадий процесса накопления дефектов при деформировании горных пород

Проведен анализ результатов лабораторных экспериментов по деформированию горных пород и натурных измерений на действующем горном предприятии. Показано, что в рассмотренных экспериментах выделяются две стадии дефектообразования. Анализ энергетических распределений сигналов акустической эмиссии показал, что на первой стадии распределение имеет экспоненциальный вид. Происходит хаотичное образование дефектов по всему объему. На второй стадии появляются пространственные области, в которых система переходит в состояние самоорганизованной критичности. Наблюдается локализация дефектообразования. Энергетическое распределение сигналов акустической эмиссии становится степенным. С помощью компьютерного моделирования был проведен расчет напряжений в ансамблях дефектов одинакового и существенно различающегося размера. Обнаружены «опасные» конфигурации дефектов, развитие которых приводит к образованию дефектов, способных к саморазвитию даже в условиях постоянной нагрузки, что ведет к появлению магистральной трещины. Предложенный нами подход позволяет понять физическую основу многостадийного характера процесса дефектообразования. Показано, что функциональный вид энергетического распределения сигналов АЭ на ранних этапах нагружения позволяет выделить пространственную область образца, в которой в дальнейшем произойдет локализация дефектообразования, приводящая к макроразрушению.

Ключевые слова: очаг разрушения, дефект, акустическая эмиссия, энергетическое распределение.

Введение

Работы, посвященные исследованию развития разрушения на микроуровне (трещины) в хрупких гетерогенных материалах, в том числе горных породах, ведутся не один десяток лет [17, 21]. Однако к настоящему времени нет определенного понимания того, какова связь разрушения с образованием и накоплением дефектов в деформируемом материале и каким образом возникновение единичных дефектов приводит к разрушению образца.

© Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г., 2014

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-05-00152_a).

Одним из немногих (пожалуй, единственным) методом, позволяющим исследовать образование и накопление дефектов в объеме образца в процессе деформирования, является метод акустической эмиссии (АЭ) [4].

Экспериментальные базы данных содержат десятки (сотни) тысяч сигналов АЭ, поэтому вполне естественно для анализа использовать статистические методы обработки. Конечно, с помощью статистической обработки сложно понять механизм разрушения, но можно выявлять закономерности процесса.

Существует большое число различных статистических параметров: это фрактальная размерность, спектр мощности временной автокорреляционной функции, корреляционный интеграл, дисперсия коэффициентов вейвлет-преобразования исследуемого временного ряда и др. Поведение этих параметров при накоплении дефектов в образцах гранита подробно анализировалось В.Л. Гиляровым [3]. В его работах показано, что при приближении к макроразрушению все эти параметры изменяются.

Еще один подход – анализ распределений числа сигналов АЭ по энергии.

В сейсмологии общепринято, что распределение числа землетрясений по магнитуде (энергии) для любого заданного региона и промежутка времени описывается степенной функцией [13, 15, 16, 23, 24] – закон Гутенберга–Рихтера. Распределения числа событий по энергии анализировались не только на больших масштабах разрушения – землетрясения, горные удары, но и в лабораторных экспериментах по деформированию образцов горных пород [2, 20, 23]. В этих работах основное внимание уделялось анализу изменения угла наклона графика повторяемости (*b-value*).

В ряде работ [5, 13] показано, что перед крупным событием (т.е. событием, сопровождающимся АЭ-сигналом с большой энергией) угол наклона графика повторяемости изменяется характерным образом.

Однако при анализе лабораторных экспериментов по деформированию образцов горных пород и натурных измерений на действующем горном предприятии мы столкнулись с тем, что распределение сигналов акустической эмиссии по энергии не всегда удается аппроксимировать степенной функцией. В связи с этим были поставлены задачи:

1. Выяснить условия, при которых распределение по энергии аппроксимируется степенной функцией.
2. Выяснить, существуют ли ситуации, при которых распределение имеет функциональный вид, отличный от степенного.
3. Установить связь между функциональным видом распределения и особенностями процесса накопления дефектов.

Материал и методика эксперимента

Проведен анализ лабораторных экспериментов и данных мониторинга акустической эмиссии на одном из действующих горных предприятий Дальнего Востока России.

В экспериментах на установке, позволяющей управлять деформацией и давлением подводимой к образцу воды (подробнее описано в [19, 25]), испытывались цилиндрические образцы гранита Вестерли ($h=190.5$ мм, $d=76,2$ мм). Образцы деформировали в условиях постоянного всестороннего сжатия и одноосного осевого нагружения. Наблюдение за трещинообразованием проводилось с помощью регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ). Известно, что основным источником АЭ в горных породах являются образующиеся трещины [10], и существует связь между параметрами трещин и АЭ-сигналов [8]. Точность определения координат гипоцентров источников АЭ составила ± 4 мм во всем объеме образца, для более чем 10^4 сигналов. В результате проведенного эксперимента формировалась база данных, которая представляет собой набор параметров хронологически последовательных сигналов АЭ. Каждый сигнал характеризовался временем излучения, тремя координатами гипоцентра и амплитудой, приведенной к определенной референс-сфере. Необходимо отметить, что приведенная амплитуда не зависит от геометрии расположения пьезопреобразователей и может служить энергетической характеристикой источника сигнала.

Аналогичная база данных получена в результате измерений, проводимых Институтом горного дела ДВО РАН г. Хабаровска на глубоких горизонтах месторождения «Антей». Было зарегистри-

стрировано около 7000 событий в энергетическом диапазоне от единиц до тысяч Джоулей за период наблюдений с января 2010 по январь 2011 (13 месяцев).

Разрушение природного массива (действующее горное предприятие)

Распределения АЭ-сигналов по энергии строились не для всей совокупности данных, а за последовательные промежутки времени (по месяцам). Для удобства анализа и наглядности распределения строились в двойных логарифмических координатах и в полулогарифмических координатах. Распределения, построенные для данных, зарегистрированных во 2-м, 4-м, и 5-м месяцах наблюдений, показаны на рис. 1. Видно, что в двойных логарифмических координатах данные не удается аппроксимировать линейной функцией.

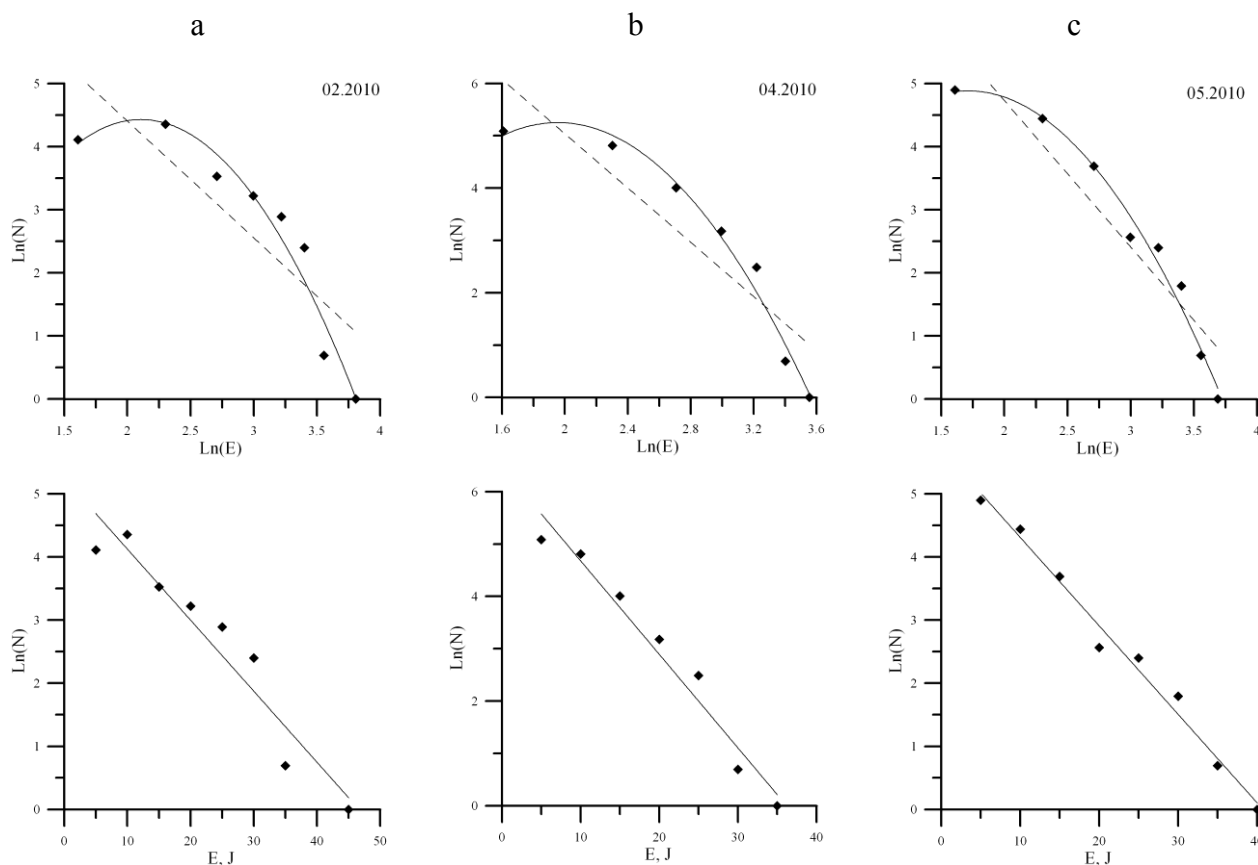


Рис. 1. Распределение по энергии АЭ-сигналов, зарегистрированных в начальный период наблюдений на контролируемом целике действующего горного предприятия

Напротив, в полулогарифмических координатах данные аппроксимируются линейной функцией. Это означает, что распределение экспоненциальное. Было обнаружено, что в течение первых шести месяцев наблюдения распределения АЭ-сигналов по энергии имеют экспоненциальный вид.

В 7-м и 8-м месяцах при аппроксимации распределений не удается отдать предпочтение степенной или экспоненциальной функции (рис. 2). (Более подробно это наблюдение будет обсуждено при анализе лабораторных экспериментов, приведенном ниже в данной статье.)

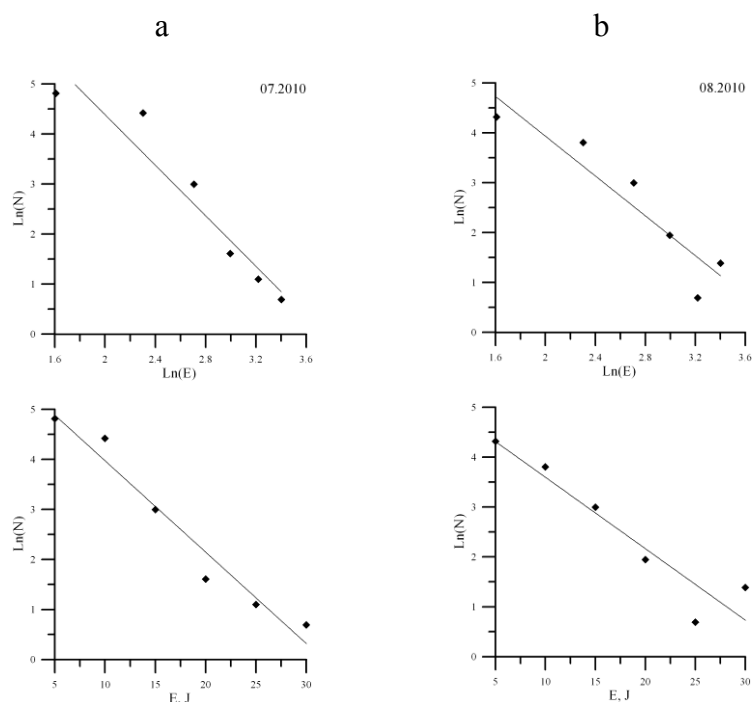


Рис. 2. Распределение по энергии АЭ-сигналов, зарегистрированных в 7-м (а) и 8-м (б) месяцах наблюдений на контролируемом целике действующего горного предприятия

На рис. 3 показаны распределения, полученные в 11-м и 13-м месяцах. Аналогичный вид имеют энергетические распределения, полученные в 9–13-м месяцах наблюдения. Видно, что функциональный вид распределения изменился. Данные хорошо аппроксимируются линейной функцией в двойных логарифмических координатах, т.е. распределение является степенным.

Таким образом, мы обнаружили, что в ряде случаев существует отклонение от закона Гутенберга–Рихтера – распределение по энергии не всегда степенное.

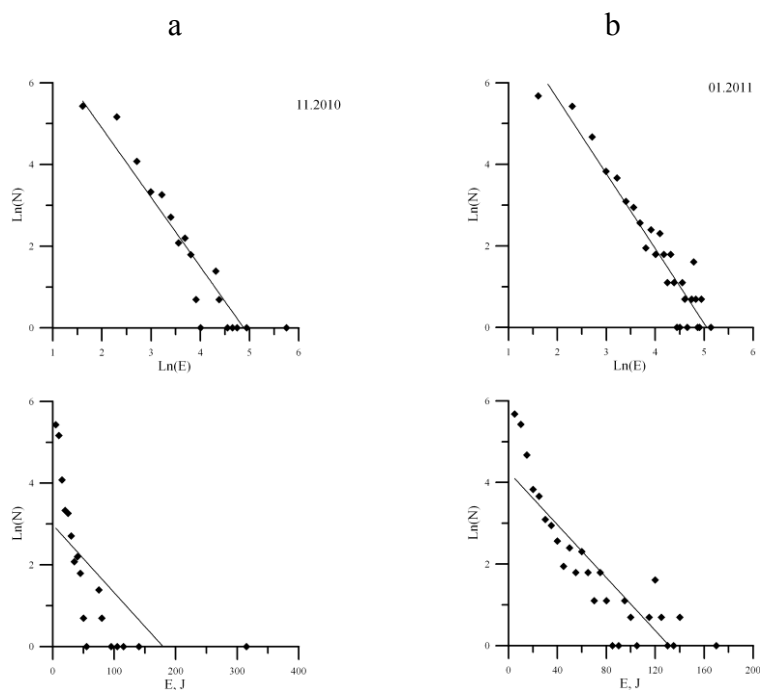


Рис. 3. Распределение по энергии АЭ-сигналов, зарегистрированных в 11-м(а) и 13-м (б) месяцах наблюдений на контролируемом целике действующего горного предприятия

С чем может быть связан различный функциональный вид энергетического распределения? Сопоставим энергетические распределения с пространственным распределением этих же дефектов. Пространственные распределения дефектов, так же как и энергетические распределения АЭ-сигналов, строились по месяцам.

Оказалось, что в начальный период наблюдений дефекты образуются хаотично (рис. 4, а). Энергетическое распределение АЭ-сигналов, соответствующих этим дефектам, имеет экспоненциальный вид (рис. 4, b). В то время как начиная с 9-го месяца в пространственном распределении дефектов отчетливо видна локализация (рис. 4, c), и соответствующие энергетические распределения аппроксимируются степенной функцией (рис. 4, d).

Таким образом, при анализе крупномасштабного разрушения природного массива обнаружено, что различному характеру накопления дефектов соответствует различный функциональный вид энергетического распределения АЭ-сигналов.

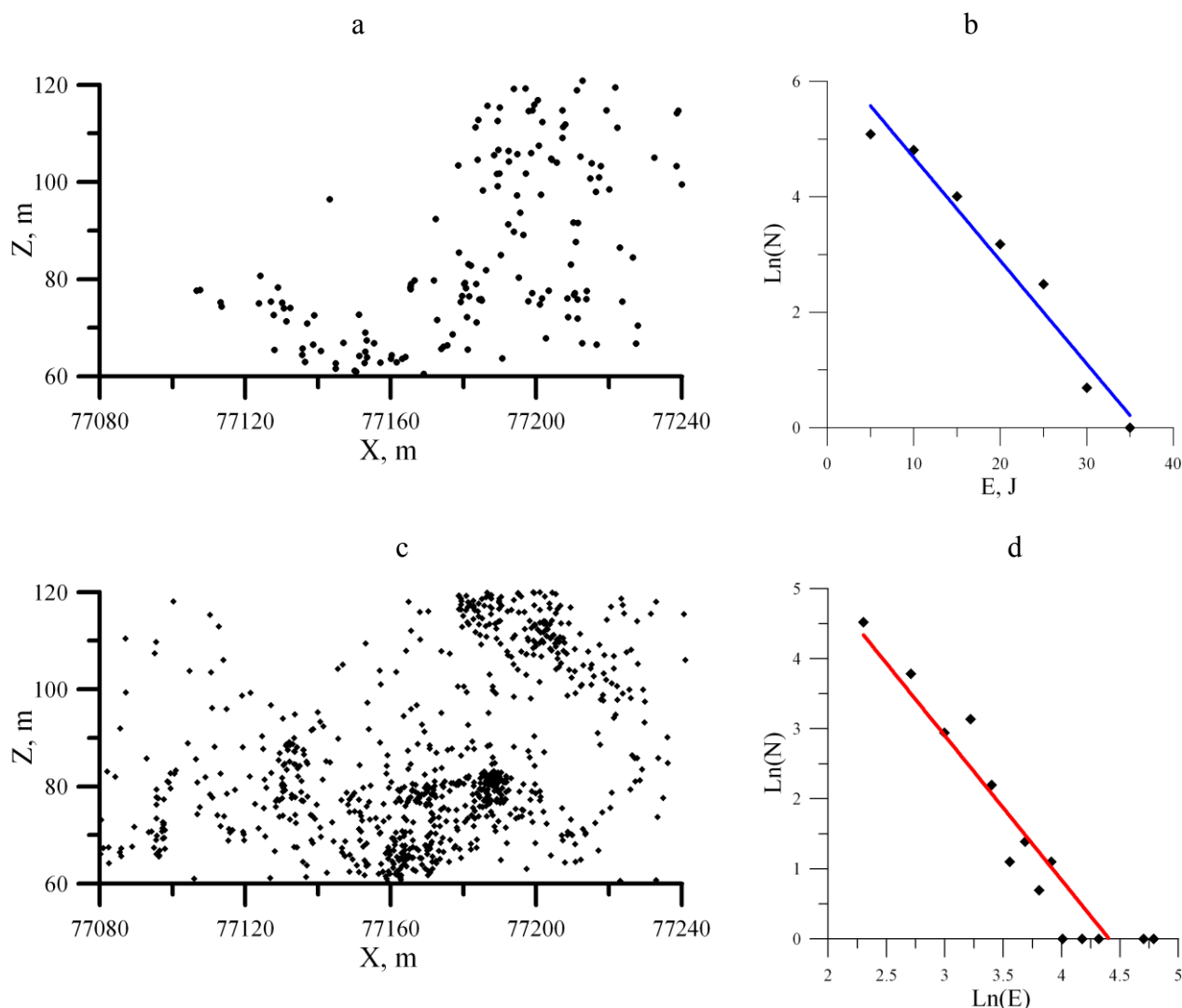


Рис. 4. Пространственный анализ накопления дефектов в контролируемом целике. Проекция координат гипоцентров источников АЭ: а – дисперсное разрушение (4-й месяц); с – локализованное разрушение (10-й месяц). Соответствующие распределения по энергии АЭ-сигналов: b – 4-й месяц; d – 10-й месяц

Лабораторные эксперименты по деформированию образцов горных пород

Подробный пространственно-временной анализ развития разрушения в экспериментах был проведен ранее в [6]. В данной работе осуществлен детальный анализ распределений АЭ-сигналов, зарегистрированных на разных этапах деформирования. Был проведен анализ серии экспериментов. Покажем общие (характерные) результаты на примере одного из них.

На рис. 5, а показано пространственное распределение дефектов в образце на ранней стадии деформирования (0.5–0.6 времени до разрушения образца). Дефекты образуются хаотично во всем объеме образца. Однако распределение АЭ-сигналов по энергии не удается однозначно аппроксимировать ни степенной, ни экспоненциальной функцией. Это наглядно иллюстрируют рис. 5, b, c, на которых данное распределение построено в полулогарифмических и в двойных логарифмических координатах. Это означает, что имеет место наложение функций. Мы предположили, что такая картина возможна, если в различных пространственных частях образца характер дефектообразования различный. (Подобный результат обнаружен и при анализе данных, полученных на руднике.)

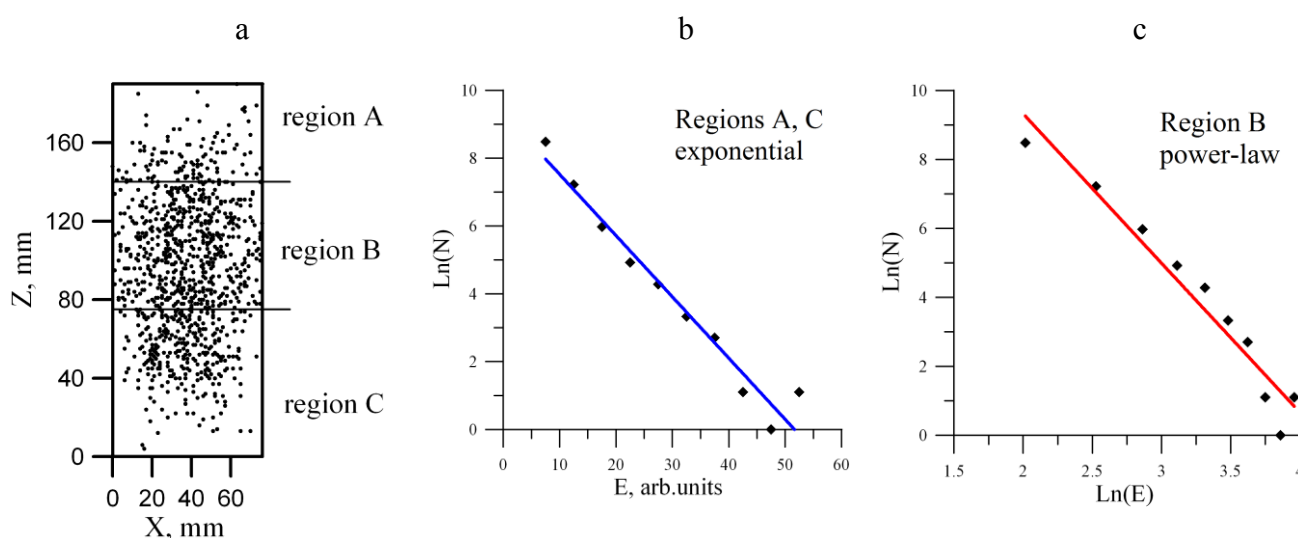


Рис. 5. Пространственный и энергетический анализ разрушения гранитных образцов. Проекции координат гипоцентров источников АЭ: а – начальная стадия нагружения (АЭ-сигналы, зарегистрированные в период времени от начала нагружения до 0.6 долговечности образца); b, c – распределения числа N сигналов акустической эмиссии по энергии E

Было проведено пространственное сканирование образца: выделялся некий пространственный объем и строилось распределение для сигналов только из этого объема, затем происходило смещение этого объема, и процедура повторялась. В результате оказалось, что в образце хорошо выделяются области, в которых распределение аппроксимируется экспоненциальной функцией (рис. 6, а, области А, С на рис. 5, а), и области, в которых распределение аппроксимируется степенной функцией (рис. 6, b, область В на рис. 5, а). (Отметим, что никакая амплитудная селекция сигналов не позволяет обнаружить «особенность» области В на пространственном распределении проекций гипоцентров.)

На завершающем этапе деформирования наблюдается локализация дефектообразования. Это наглядно иллюстрирует пространственное распределение проекций гипоцентров (рис. 7, а). (Наиболее отчетливо область локализации выявляется при анализе сигналов с относительно большими амплитудами.) Распределение по энергии АЭ-сигналов имеет степенной вид (рис. 7, b). Важно отметить, что локализация дефектообразования происходит именно в той пространственной области (область В), в которой еще на ранних этапах энергетическое распределение имело степенной вид.

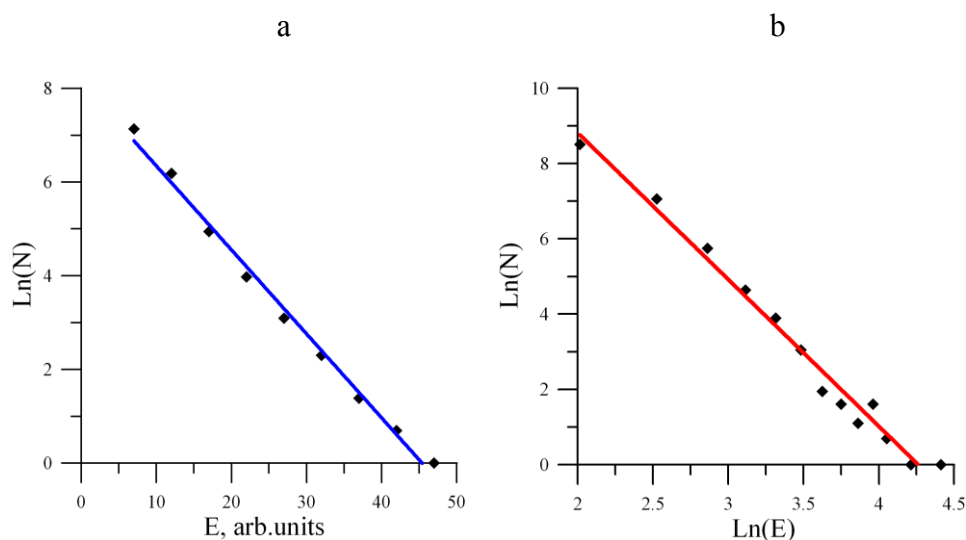


Рис. 6. Энергетический анализ разрушения гранитных образцов (период времени от начала нагружения до 0.6 долговечности образца). Распределения числа N сигналов акустической эмиссии по энергии E , полученные в результате пространственного «сканирования» образца: а – области А, С; б – область В

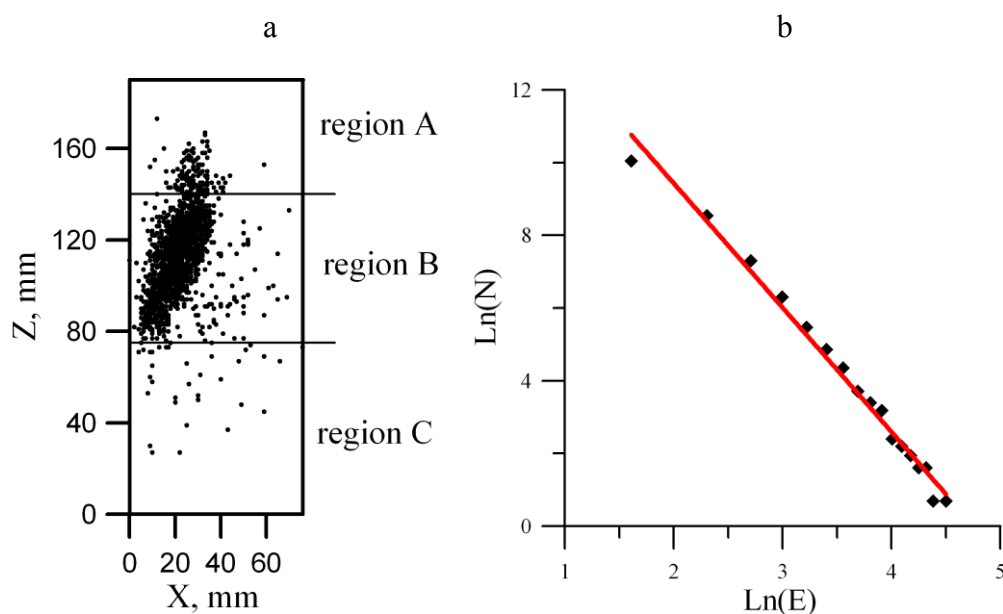


Рис. 7. Пространственный и энергетический анализ разрушения гранитных образцов (период времени от 0.9 долговечности вплоть до разрушения образца): а – проекции координат гипоцентров источников АЭ; б – распределения числа N сигналов акустической эмиссии по энергии E

Таким образом, анализ лабораторных экспериментов и крупномасштабного разрушения показал следующее:

- дисперсному накоплению дефектов соответствует экспоненциальное распределение;
- локализованному накоплению дефектов соответствует степенное распределение;
- если распределение не удастся аппроксимировать степенной или экспоненциальной функцией, то следует провести пространственное «сканирование» образца для выделения областей с явно выраженным функциональным видом распределения.

Мы полагаем, что этот результат позволяет говорить о том, что функциональный вид распределения энергии АЭ-сигналов может служить индикатором характера накопления дефектов.

Обсуждение

В большом числе экспериментов по деформированию горных пород – и в тех, которые анализировали мы [6], и в тех, что известны по работам других исследователей [19, 22], – наблюдалось хаотичное дефектообразование, затем локализованное (формирование очага разрушения). Именно со стадией локализованного дефектообразования связано макроразрушение (или потеря целостности). Однако к настоящему времени нет определенного понимания того, почему происходит этот качественный переход в характере дефектообразования (с чем он связан).

Мы предполагаем, что функциональный вид энергетического распределения поможет установить физическую основу (природу) характера дефектообразования.

Известно, что для простых систем [9] характерно экспоненциальное распределение случайной величины x

$$\frac{\Delta n}{\Delta x} \sim \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right).$$

При экспоненциальном распределении имеется характерный масштаб x_0 , и нет однородности функции распределения относительно величины x . В нашем случае под «простой системой» мы понимаем совокупность независимо образующихся под действием механической нагрузки дефектов (трещин).

На ранних этапах деформирования наблюдается экспоненциальное распределение АЭ-сигналов по энергии:

$$\frac{\Delta N}{\Delta E} \sim \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right).$$

В данном случае E_0 – характерная энергия. Принято считать, что имеется корреляция между размером дефекта и выделившейся при его образовании энергией [8]. Следовательно, характерная энергия предполагает «характерный» размер дефекта d_0 .

Можно предположить, что дефекты, которые образуются на ранних этапах при невысоких нагрузках, связаны с неким характерным элементом структуры. Для лабораторных образцов горных пород это может быть, например, зерно. Трещина либо проходит по телу зерна и упирается в границы, либо распространяется вдоль границы. В высокопористых материалах (например, песчаник с пористостью 20–25%) характерным элементом структуры может быть межпоровая перемычка. Однако, по-видимому, напряжения (не только средние, но и локальные), которые достигаются в материале при хаотичном (равномерном) дефектообразовании, недостаточно высоки для того, чтобы обеспечить рост (развитие) образовавшегося дефекта.

На этом этапе дефекты образуются хаотично по всему объему. По существу происходит разрушение слабых мест. Образование такого дефекта приводит к релаксации локальных напряжений, и, что очень важно, дальнейшего роста этого дефекта не наблюдается (он сохраняет «характерный» размер).

Эти предположения были проверены с помощью компьютерного моделирования [12]. На основании экспериментальных результатов [25] была оценена объемная доля трещин и, как следствие, среднее расстояние между ними, на ранних этапах деформирования. Затем с учетом этих данных был проведен расчет напряжений в ансамбле дефектов одинакового (равного) размера. Напряжения рассчитывались с помощью метода конечных элементов. На рис. 8 приведена эпюра напряжений, возникающих в таком ансамбле. Установлено, что локальные напряжения даже вблизи поверхности этих дефектов далеки от теоретической прочности, а следовательно, недостаточны для разрушения материала.

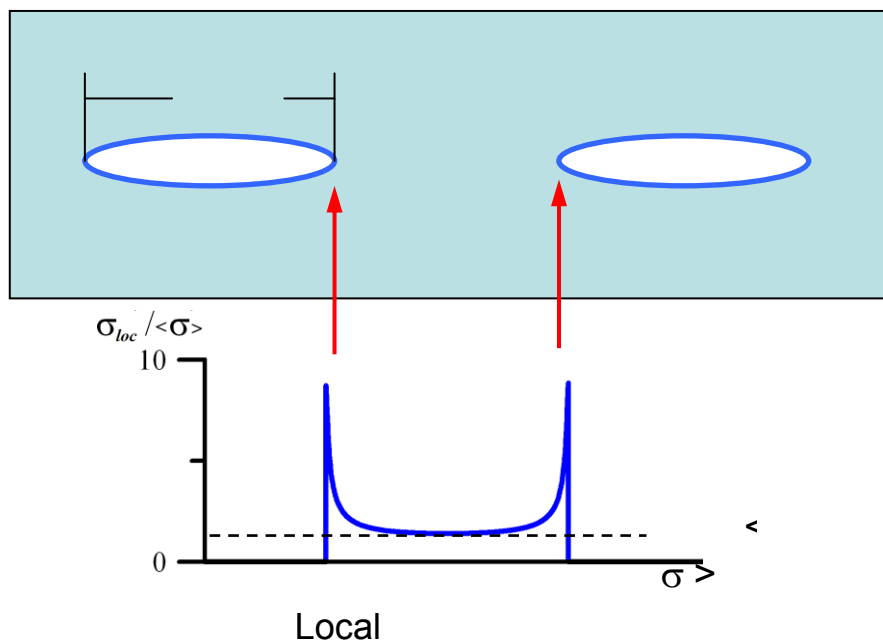


Рис. 8. Эпюра напряжений, возникающих в ансамбле дефектов одинакового размера: σ_{loc} – локальное напряжение, $\langle \sigma \rangle$ – среднее напряжение

Не вдаваясь в подробности причин [6], отметим, что в экспериментах [25], в которых деформировали гранитный образец полностью насыщенный водой, вплоть до разрушения дефектообразование происходило хаотично во всем объеме образца. Локализация не наблюдается. Это видно на пространственном распределении дефектов (рис. 9, а). В этом случае изменился механизм разрушения, который был подробно описан в [6].

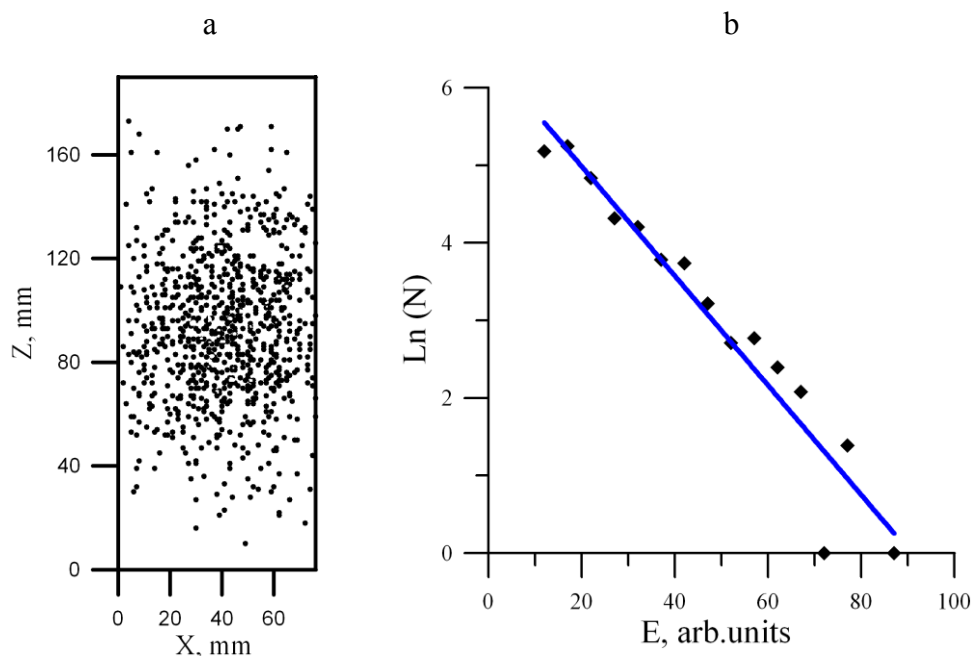


Рис. 9. Пространственный и энергетический анализ разрушения водонасыщенных гранитных образцов: а – проекции координат гипоцентров источников АЭ; б – распределения числа N сигналов акустической эмиссии по энергии E

Энергетическое распределение АЭ-сигналов как во всем объеме образца, так и в любых пространственных областях сохраняет экспоненциальный вид (рис. 9, b) и не переходит в степенную функцию вплоть до разрушения образца.

В общем случае в процессе эволюции система становится сложной [9, 11]. Это означает, что систему нельзя описать как сумму невзаимодействующих простых систем. Мы под «сложной системой» будем понимать совокупность взаимодействующих трещин, в которой появление нового дефекта влияет на развитие процесса. Сложная система переходит в состояние самоорганизованной критичности [14]. Такой системе присущи степенные распределения.

$$\frac{\Delta N}{\Delta E} \sim E^k.$$

Степенной закон распределения, говорит о скейлинговом поведении системы, т.е. об отсутствии характерных масштабов (в отличие от экспоненциального распределения).

Если в некотором объеме процесс образования дефектов перешел в состояние самоорганизованной критичности, то распределение АЭ-сигналов по энергии должно приобрести степенной вид. В силу неоднородности структурных элементов по размеру и прочности переход в состояние самоорганизованной критичности происходит не сразу во всем объеме, а в некоторых областях. Именно это и наблюдается в эксперименте (область В на ранних этапах деформирования на рис. 5, a).

По мере деформирования средние и локальные напряжения во всем образце достигают величины, достаточной для разрушения более прочных структурных элементов. Это приводит к появлению «опасных» конфигураций (ансамблей) дефектов. Как показало компьютерное моделирование, в простейшем случае (в первом приближении), такая конфигурация состоит из дефектов трех размеров [7]. Размеры дефектов отличаются в несколько раз (рис. 10). Локальные напряжения в «опасных» конфигурациях (рис. 10) в несколько раз выше, чем в ансамблях из дефектов равных размеров. Величина локальных напряжений приближается к теоретической прочности, что является условием разрушения материала.

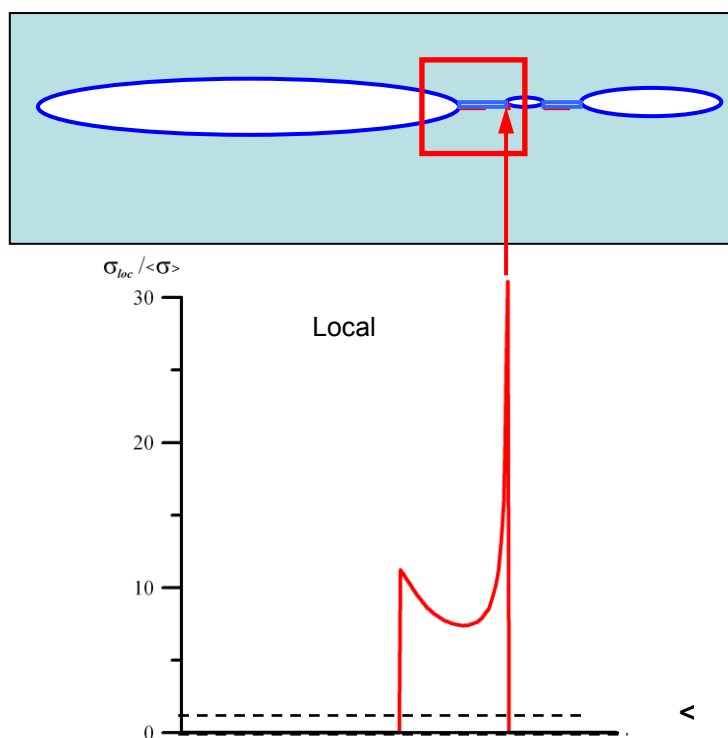


Рис. 10. Эпюра напряжений, возникающих в «опасном» ансамбле дефектов: σ_{loc} – локальное напряжение, $\langle \sigma \rangle$ – среднее напряжение

Разрушение перемычек между дефектами в «опасных» конфигурациях приводит к образованию новых дефектов, размеры которых не определяются структурой материала. Далее преимущественное значение приобретают концентраторы, созданные ансамблями новых дефектов. «Опасные» конфигурации и являются «зародышами» очага. Развитие этих дефектов и приводит к образованию магистральной трещины, которая разрушает образец.

Выводы

Анализ результатов лабораторных экспериментов и натуральных измерений показал, что распределение АЭ-сигналов по энергии не всегда аппроксимируется степенной функцией. (Отметим, что в работе [1] подобный результат наблюдался для другого класса материалов, а именно для металлов, при анализе амплитудных распределений сигналов АЭ.)

В рассмотренных экспериментах выделяются две стадии (этапа) дефектообразования.

Первая стадия. Образование дефектов «характерного» размера, который определяется «характерным элементом» структуры материала. На это указывает экспоненциальный вид энергетического распределения АЭ-сигналов, который означает, что имеется характерная энергия E_0 (характерный размер дефекта d_0). Наблюдается хаотичное образование дефектов по всему объему.

Вторая стадия. В процессе эволюции деформируемого материала появляются пространственные области, в которых система переходит в состояние самоорганизованной критичности, на что указывает степенной вид энергетического распределения. Появляются «опасные» конфигурации дефектов. Эти конфигурации приводят к образованию дефектов, которые не определяются структурой материала и способны к саморазвитию. Мы полагаем, что «опасные» конфигурации и являются «зародышами» очага.

Анализ энергетических распределений позволил обнаружить качественный переход дефектообразования на вторую стадию раньше, чем это удастся сделать другими методами.

Предложенный нами подход не противоречит двухстадийной модели разрушения гетерогенных материалов [18] и модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [10] и позволяет понять физическую основу многостадийного характера процесса дефектообразования.

Показано, что функциональный вид распределения на ранних этапах нагружения позволяет выделить пространственную область образца, в которой в дальнейшем произойдет локализация дефектообразования, приводящая к макроразрушению.

Авторы выражают благодарность И.Ю. Рассказову (ИГД ДВО РАН г. Хабаровска) за предоставленную базу данных, полученную при мониторинге рудника «Глубокий» ОАО «ППГХО».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвина Л.Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. 2011. № 10. С. 5–18.
2. Виноградов С.Д. О распределении числа импульсов по энергии при разрушении горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1959. № 12. С. 1850–1852.
3. Гиляров В.Л., Варкентин М.С., Корсуков В.Е., Корсукова М.М., Куксенко В.С. Формирование степенных распределений дефектов по размерам в процессе разрушения материалов // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1311–1315.
4. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.
5. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с.
6. Кадомцев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 1777–1782.
7. Кадомцев А.Г., Слуцкер А.И., Синани А.Б., Бетехтин В.И., Дамаскинская Е.Е. Локальные разрушающие напряжения и твердость микропористой SiC-керамики // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. С. 1533–1534.
8. Куксенко В.С., Ляшков А.И., Мирзоев К.М. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии // ДАН СССР. 1982. Т. 264, № 4. С. 846–848.

9. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 360 с.
10. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процесса подготовки землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С. 2526–2530.
11. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
12. Слуцкер А.И., Кадомцев А.Г., Бетехтин В.И., Дамаскинская Е.Е., Синани А.Б. Локальные разрушающие напряжения в нагружаемой микропористой SiC-керамике // Известия РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 10. С. 1496–1502.
13. Соболев Г.А., Арора Б., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д., Пономарев А.В., Кумар Н., Чабак С.К., Байдия П.Р. Прогностические аномалии сейсмического режима. Ч. 2. Западные Гималаи // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С. 23–36.
14. Bak P. How Nature Works. NY, Springer-Verlag, 1996.
15. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed. Princeton, N.J., Princeton Univ. Press, 1954. 284 p.
16. Kei Katsumata. Imaging the high b-value anomalies within the subducting Pacific plate in the Hokkaido corner. E-LETTER Earth Planets Space. 2006, 58, e49-e52.
17. King G.C.P., Sammis C.G.. The mechanisms of finite brittle strain. Pure Appl. Geophys. 1992;(138)4:611-640.
18. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks. Pure Appl. Geophys. 1996;(146)2:253-263.
19. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, ed. B. Evans, T.-F. Wong. L., Academic Press, 1992, p. 3-31.
20. Mogi K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena. Bull. Earthq. Res. Inst. 1962;(40)7:125-173.
21. Paterson M., Experimental Rock Deformation. New York, Springer, 1978, 254 pp.
22. Petružálek M., Vilhelm J., Rudajev V., Lokajíček T., Svitek T. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013;60:208-216.
23. Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A. Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones. Tectonophysics. 1997;277:57-81.
24. Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M. Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of *b* values. Journal of Geophysical Research. 2004;(109), B12307, doi:10.1029/2004JB003234. PP.17.
25. Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V. Anisotropic Changes in P-Wave Velocity and Attenuation during Deformation and Fluid Infiltration of Granite. Bulletin of the Seismological Society of America. 2003;(93) 4:1803-1822.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

Damaskinskaya E.E., Kadomtsev A.G.

EKATERINA E. DAMASKINSKAYA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Laboratory of Physics of Strength (Ioffe Institute, St. Petersburg), e-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru; ANDREJ G. KADOMTSEV, Head, Laboratory of Physics of Strength, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Ioffe Institute, St. Petersburg), e-mail: Andrej.Kadomtsev@mail.ioffe.ru

Physical “symptoms” of defect accumulation stages at deformation of rocks

The analysis of laboratory experiments on the deformation of mountain rocks and in-situ measurements have shown that there are two stages of defect accumulation. The first stage. The formation of defect with specific size which is determined by a typical structural element of a material. Arising defects are generated chaotically throughout the sample volume. The second stage of the deformation process is the emergence of spatial zones in which the system passes into the state of self-organized criticality. The localisation of defect formation is observed. As simulation has shown, the evolution of the “dangerous” ensembles gives rise to the formation of defects capable of development even under constant loads, which results in a fault. We are able to distinguish between the first and the second stages by way of a study of the acoustic emission signals. The analysis of the energy distribution of the acoustic emission signals caused by the deformation of rocks has shown that, at the first stage, the distribution is approximated by the exponential function. At the second stage, the energy distributions becomes the power-law. The functional form of energy distribution at the initial stages of loading allows one to reveal the spatial zone of the sample in which the localization of defect formation leading to eventual macrofracture will occur.

Key words: fracture nucleation site, defect, acoustic emission, energy distribution.

REFERENCES

1. Botvina L.R. Damage Evolution on Different Scale Levels. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2011;(47)10:859-872. (in Russ.). [Botvina L.R. Jevoljucija povrezhdennosti na razlichnyh masshtabah // *Fizika Zemli*. 2011. № 10. S. 5–18].
2. Vinogradov S.D. About energy distribution of number of impulses during fracture of rocks. *Izvestiya. Geophysics*. 1959;12:1850-1852. (in Russ.). [Vinogradov S.D. O raspredelenii chisla impul'sov po jenergii pri razrushenii gornyh porod // *Izv. AN SSSR. Ser. Geofiz.* 1959. № 12. S. 1850–1852].
3. Hilarov V.L., Varkentin M.S., Korsukov V.E., Korsukova M.M., Kuksenko V.S. Formation of power-law size distributions of defects during fracture of materials. *Physics of the Solid State*. 2010;(52)7:1404-1408. (in Russ.). [Giljarov V.L., Varkentin M.S., Korsukov V.E., Korsukova M.M., Kuksenko V.S. Formirovanie stepennyh raspredelenij defektov po razmeram v processe razrushenija materialov // *FTT*. 2010. T. 52. S. 1311–1315].
4. Ermolov I.N., Alyeshin N.P., Potapov A.I. *Nondestructive evolution. Book 2. Acoustic methods of testing*. M., High School, 1991, 283 p. (in Russ.). [Ermolov I.N., Aleshin N.P., Potapov A.I. *Nerazrushajushhij kontrol'*. Kn. 2. Akusticheskie metody kontrolja. M.: Vysshaja shkola, 1991. 283 s.].
5. Zavyalov A.D. *Medium-term prediction of earthquakes: basis, technique, realization*. M., Nauka. 2006, 242 p. (in Russ.). [Zav'jalov A.D. *Srednesrochnyj prognoz zemletrjasenij: osnovy, metodika, realizacija*. M.: Nauka, 2006. 242 s.].
6. Kadomtsev A.G., Damaskinskaya E.E., Kuksenko V.S. Fracture features of granite under various deformation conditions. *Phys. Solid State*. 2011;(53):1876-1881. (in Russ.). [Kadomtsev A.G., Damaskinskaja E.E., Kuksenko V.S. Osobennosti razrushenija granita pri razlichnyh uslovijah deformirovanija // *FTT*. 2011. T. 53. S. 1777–1782].
7. Kadomtsev A.G., Slutsker A.I., Sinani A.B., Betekhtin V.I., Damaskinskaya E.E. Local breaking stresses and hurdness of microporous SiC ceramics. *Vestnik of Tambov. Univ. Technical Sciences*. 2013;18:1533-

1534. (in Russ.). [Kadomcev A.G., Slucker A.I., Sinani A.B., Betehtin V.I., Damaskinskaja E.E. Lokal'nye razrushajushhie naprjazhenija i tverdost' mikroporistoj SiC-keramiki // Vestn. Tambov. un-ta. Ser. Estestvennye i tehničeskie nauki. 2013. T. 18. S. 1533–1534].
8. Kuksenko V.S., Lyashkov A.I., Mirzoev K.M. Correlation between the sizes of the cracks and duration of emission of elastic energy during loading. Doklady AN SSSR. 1982;(264);4:846-848. (in Russ.). [Kuksenko V.S., Ljashkov A.I., Mirzoev K.M. Svjaz' mezhdru razmerami obrazujushhihsja pod nagruzkoj treshhin i dlitel'nost'ju vydelenija uprugoj jenerгии // DAN SSSR. 1982. T. 264, № 4. S. 846–848].
 9. Malineckij G.G., Potapov A.B. Modern problems of nonlinear dynamics. M., Editorial URSS, 2002, 360 p. (in Russ.). [Malineckij G.G., Potapov A.B. Sovremennye problemy nelinejnoj dinamiki. M.: Jeditorial URSS, 2002. 360 s.].
 10. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Laboratory and theoretical investigation of process of earthquake preparation. Izv. AN SSSR. Physics of Earth. 1974;10:2526-2530. (in Russ.). [Mjachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Laboratornye i teoreticheskie issledovanija processa podgotovki zemletrjasenija // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli. 1974. № 10. S. 2526–2530].
 11. Nicolis G., Prigozhin I. Self-organization in nonequilibrium systems. M., Mir, 1979, 512 p. (in Russ.). [Nikolis G., Prigozhin I. Samoorganizacija v neravnovesnyh sistemah. M.: Mir, 1979. 512 s].
 12. Slutsker A.I., Kadomtsev A.G., Betehtin V.I., Damaskinskaja E.E., Sinani A.B. Local breaking stresses in loaded microporous SiC ceramics. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009;(73)10:1410-1415. (in Russ.). [Slucker A.I., Kadomcev A.G., Betehtin V.I., Damaskinskaja E.E., Sinani A.B. Lokal'nye razrushajushhie naprjazhenia v nagružaemoj mikroporistoj SiC-keramike // Izvestija RAN. Ser. fizicheskaja. 2009. T. 73, № 10. S. 1496–1502].
 13. Sobolev G.A., Arora B., Smirnov V.B., Zavyalov A.D., Ponomarev A.V., Kumar N., Chabak S.K., Baydia P.R. Predictive abnormality of seismic mode. II. The Western Himalayas. Geophysical investigation. 2009;(10)2:23-36. (in Russ.). [Sobolev G.A., Arora B., Smirnov V.B., Zav'jalov A.D., Ponomarev A.V., Kumar N., Chabak S.K., Bajdija P.R. Prognosticheskie anomalii sejsmicheskogo rezhima. Ch. 2. Zapadnye Gimalai // Geofizicheskie issledovanija. 2009. T. 10, № 2. S. 23–36].
 14. Bak P. How Nature Works. NY, Springer-Verlag, 1996.
 15. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed. Princeton, N.J., Princeton Univ. Press, 1954. 284 p.
 16. Kei Katsumata. Imaging the high b-value anomalies within the subducting Pacific plate in the Hokkaido corner. E-LETTER Earth Planets Space. 2006, 58, e49-e52.
 17. King G.C.P., Sammis C.G.. The mechanisms of finite brittle strain. Pure Appl. Geophys. 1992;(138)4:611-640.
 18. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaja E., Lockner D. A two-stage model of fracture of rocks. Pure Appl. Geophys. 1996;(146)2:253-263.
 19. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions. Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, ed. B. Evans, T.-F. Wong. L., Academic Press, 1992, p. 3-31.
 20. Mogi K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena. Bull. Earthq. Res. Inst. 1962;(40)7:125-173.
 21. Paterson M., Experimental Rock Deformation. New York, Springer, 1978, 254 pp.
 22. Petružálek M., Vilhelm J., Rudajev V., Lokajčiček T., Svitek T. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013;60:208-216.
 23. Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A. Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones. Tectonophysics. 1997;277:57-81.
 24. Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M. Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of *b* values. Journal of Geophysical Research. 2004;(109), B12307, doi:10.1029/2004JB003234. PP.17.
 25. Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V. Anisotropic Changes in P-Wave Velocity and Attenuation during Deformation and Fluid Infiltration of Granite. Bulletin of the Seismological Society of America. 2003;(93) 4:1803-1822.