

ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ УДАРНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

И.П. Щербаков, В.С. Куksenко, А.Е. Чмель

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, Россия*

Образцы мрамора и гранитов с различным размером зерен подвергались ударному разрушению в лабораторных условиях. Сигналы акустоэмиссии (АЭ), генерируемые растущими трещинами, регистрировались с шагом 10 нс. Одновременно регистрировалась фраттолюминесценция (ФЛ), возникающая при разрыве межатомных связей на поверхности образцов. Было показано, что длительности интервалов между сигналами АЭ распределены по степенному закону, характерному для коррелированных (самоподобных) процессов. Такая закономерность не проявилась для сигналов ФЛ, поскольку время образования свободных радикалов гораздо меньше интервалов между их появлением при разрывах химических связей. Данные АЭ свидетельствуют об увеличении частоты появления новых трещин в материалах с меньшим размером зерен.

Гранит, динамическое разрушение, акустическая эмиссия, фраттолюминесценция, времена ожидания.

TIME CORRELATION OF CRACK FORMATION DURING IMPACT FRACTURING OF ROCKS

I.P. Shcherbakov, V.S. Kuksenko, and A.E. Chmel'

Samples of marble and granite with different grain sizes were subjected to impact fracturing under laboratory conditions. The acoustic-emission (AE) signals generated by growing cracks were recorded at 10 ns intervals. Synchronously, the fractoluminescence (FL) resulting from the breakage of interatomic bonds on the sample surface was recorded. The duration of the intervals between the AE signals was shown to be a power-law function typical of correlated (self-similar) processes. However, the FL signals did not follow this law, because the duration of free-radical formation is much shorter than the intervals at which they appear when chemical bonds break down. The AE data indicate that new cracks appear more often in materials with a smaller grain size.

Granite, dynamic fracturing, acoustic emission, fractoluminescence, waiting time

ВВЕДЕНИЕ

Механическое разрушение является неравновесным динамическим процессом, который поддерживается потоком энергии, поступающим в напряженное твердое тело как открытую термодинамическую систему. В такой системе возникает эффект «дальнодействия», проявляющийся в том, что влияние локализованного акта разрушения (например, образования одиночной трещины) на вероятность образования другого дефекта, не спадает экспоненциально с расстоянием, как это имеет место в равновесных условиях, а распространяется с относительно медленным затуханием, определяемым степенным законом. Дальнодействие при разрушении ведет к образованию пространственных фрактальных структур [Mandelbrot, 2006], которые хорошо изучены на микроскопическом [Bouchaud, 1997; Alava et al., 2006], лабораторном [Смирнов и др., 1995; Kuksenko et al., 2005] и геофизическом уровнях [Гейликман, Писаренко, 1989; Геншафт, 2009]. Многочисленные исследования динамики разрушения твердых тел показали, что распределение высвобождаемой энергии также подчиняется степенному закону, причем показатель степени служит мерой вклада «больших» и «малых» событий в суммарное энерговыделение [Chmel et al., 2010]. Однако, насколько нам известно, все работы по изучению энергетических распределений в напряженных горных породах были выполнены при компрессионной нагрузке материалов в лабораторных [Смирнов и др., 1995; Lei, Satoh, 2007; Kuksenko et al., 2007] или естественных (земная кора [Enescu, Ito, 2001], полярный лед [Chmel, Smirnov, 2011]) условиях. В нашей недавней работе [Щербаков и др., 2011] мы приводили полученные методом акустической эмиссии (АЭ) данные по энерговыделению при динамическом (ударном) разрушении твердых тел различной степени однородности. Статистический анализ показал, что динамика «быстрого» разрушения может проявлять различную степень пространственной связности (корреляции) событий в зависимости от масштаба процесса и структурной однородности материалов, как это имеет место и при усталостном разрушении. В то же время можно ожидать,

что временные ограничения на развитие процесса по двухстадийному сценарию (накопление микродефектов → макроскопическая трещина [Дамаскинская и др., 1994; Макаров, 2007; Кадомцев и др., 2011]) могут приводить к особенностям в распределении временных параметров разрушения.

Поэтому в настоящей работе был изучен именно временной аспект динамического разрушения лабораторных образцов горных пород — методом АЭ определялось распределение длин временных интервалов между актами (событиями) разрушения, выделение энергии в которых превышает некоторое пороговое значение.

Регистрация акустической эмиссии наряду с регистрацией электромагнитной эмиссии [Яковичкая, 2008] является одним из основных методов исследования напряженного состояния и разрушения

горных пород. В настоящей работе измерение интенсивности АЭ было впервые дополнено измерением флуоресценции (триболюминесценции) с поверхности гранитов и мрамора. Источником флуоресценции (ФЛ) при разрушении горных пород является образование свободных радикалов при разрыве химических связей в напряженном материале. Метод ФЛ ранее успешно применялся в исследованиях разрушения металлов [Абрамова и др., 1998] и диэлектриков [Веттегрень и др., 2011].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцами служили мрамор и граниты трех видов, различающиеся размером зерен (рис. 1). Схематическое изображение установки приведено на рис. 2. Образцы в форме пластин размером $20 \times 15 \times 25$ мм помещались на массивную металлическую подставку с нанесенным иммерсионным слоем консистивной смазки. Локализованное разрушение производилось ударом груза, падающего с высоты 10 см на стальной боек, поставленный на поверхность образца. Повреждение имело форму лунки диаметром 1—2 мм и глубиной ~ 0.5 мм.

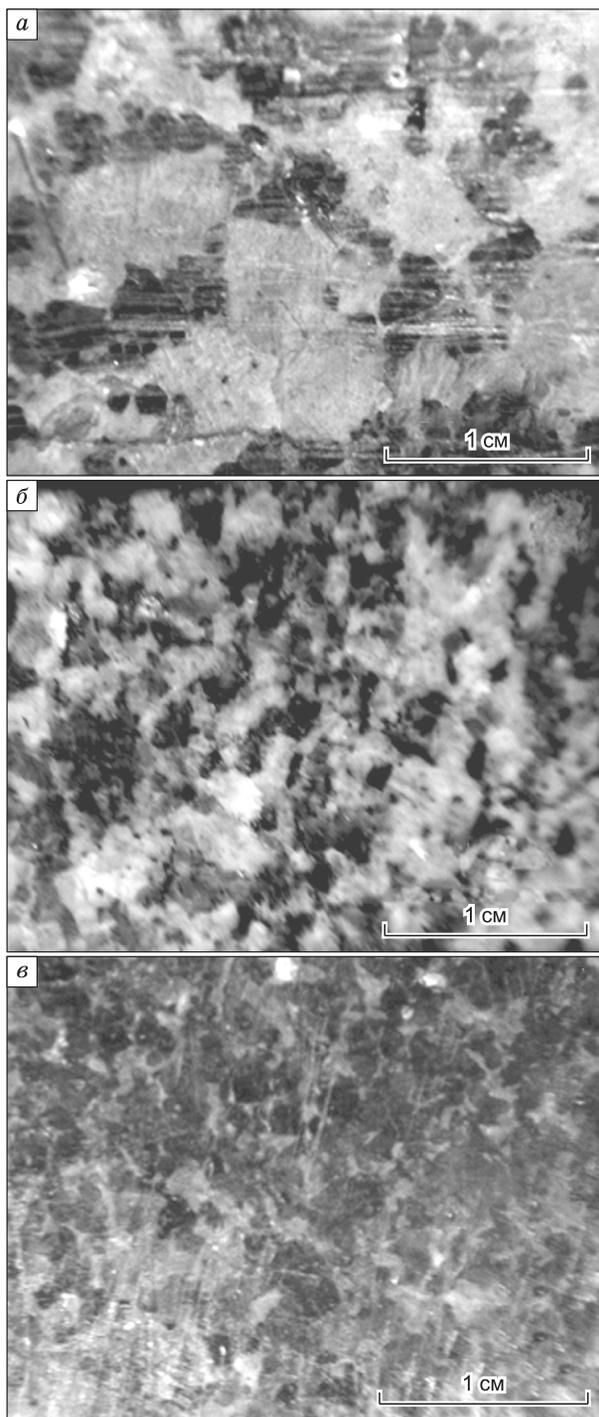


Рис. 1. Фотографии образцов крупно- (а), средне- (б) и мелкозернистого (в) гранитов.

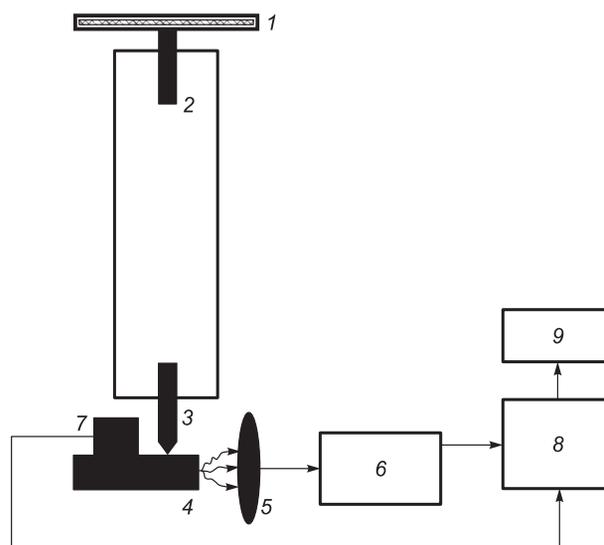


Рис. 2. Схема установки для регистрации АЭ и ФЛ при ударном разрушении.

1 — электромагнит, 2 — груз, 3 — боек, 4 — образец, 5 — кварцевая линза, 6 — фотоумножитель ФЭУ-136, 7 — пьезоэлемент, 8 — аналогово-цифровой преобразователь АСК-3106, 9 — ПК.

Для регистрации АЭ на расстоянии 3 мм от бойка с помощью парафиновой мастики закреплялась квадратная (4 × 4 мм) пластина из пьезокерамики. Люминесценция с боковой поверхности образца собиралась кварцевой линзой и направлялась на вход фотоумножителя ФЭУ-136. Сигналы АЭ и ФЛ поступали на входы двух каналов аналогово-цифрового преобразователя АСК-3106 фирмы АКТАКОМ. Система запускалась в момент касания грузом бойка. Напряжение на выходе преобразователя записывалось в память компьютера с шагом 10 нс при максимальной продолжительности сбора сигналов 1.3 мс. Предельная частота регистрируемых сигналов составляла 100 МГц. Записанные сигналы АЭ подвергались низкочастотной дискриминации на уровне 50 кГц, чтобы отделить вклад паразитных колебаний

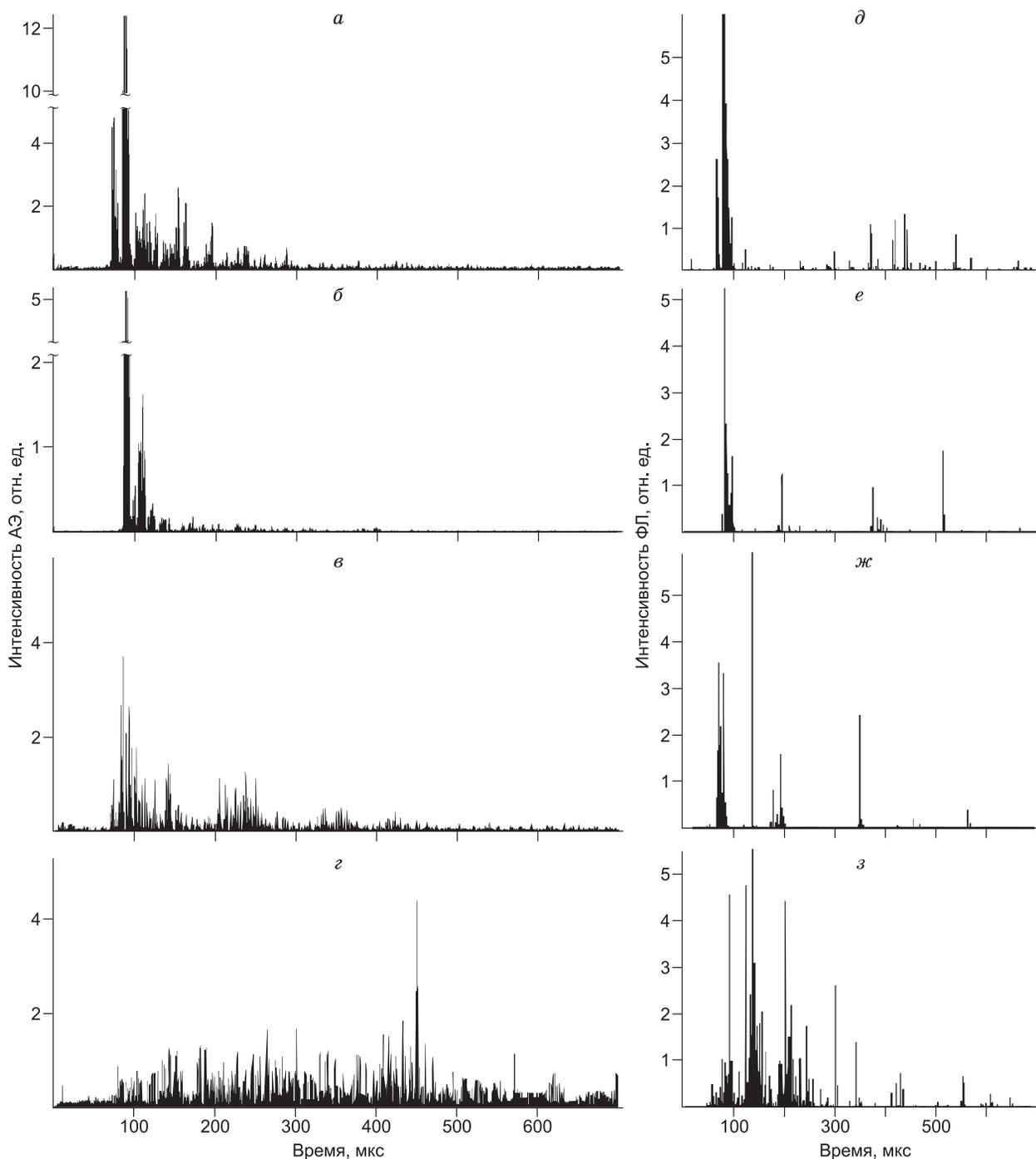


Рис. 3. Временная развертка интенсивности сигналов АЭ из образцов (а—г) и ФЛ с поверхности образцов (д—з).

а, д — крупно-, *б, е* — средне-, *в, ж* — мелкозернистые граниты, *г, з* — мрамор.

элементов экспериментальной установки, а также пьезокерамической пластины из-за прогиба образца при ударе.

Таким образом, в нашем случае «событием» являлась регистрация либо сигнала АЭ, генерируемого растущей трещиной, либо сигнала люминесценции, возбуждаемой разрывами межатомных связей в горной породе.

ВРЕМЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ

Известно [Гейликман, Писаренко, 1989; Abaimov et al., 2007; Davidsen et al., 2007], что в сжатых горных породах распределение времен ожидания отдельных событий разрушения является самоподобным, т.е. число событий N , время ожидания которых равно t , удовлетворяет уравнению

$$N(\lambda t) = \lambda^\gamma N(t). \quad (1)$$

Здесь λ — параметр масштабирования, γ — параметр самоподобия. Вместо использования параметра λ в статистике часто определяют число событий N , время ожидания которых превышает пороговое значение

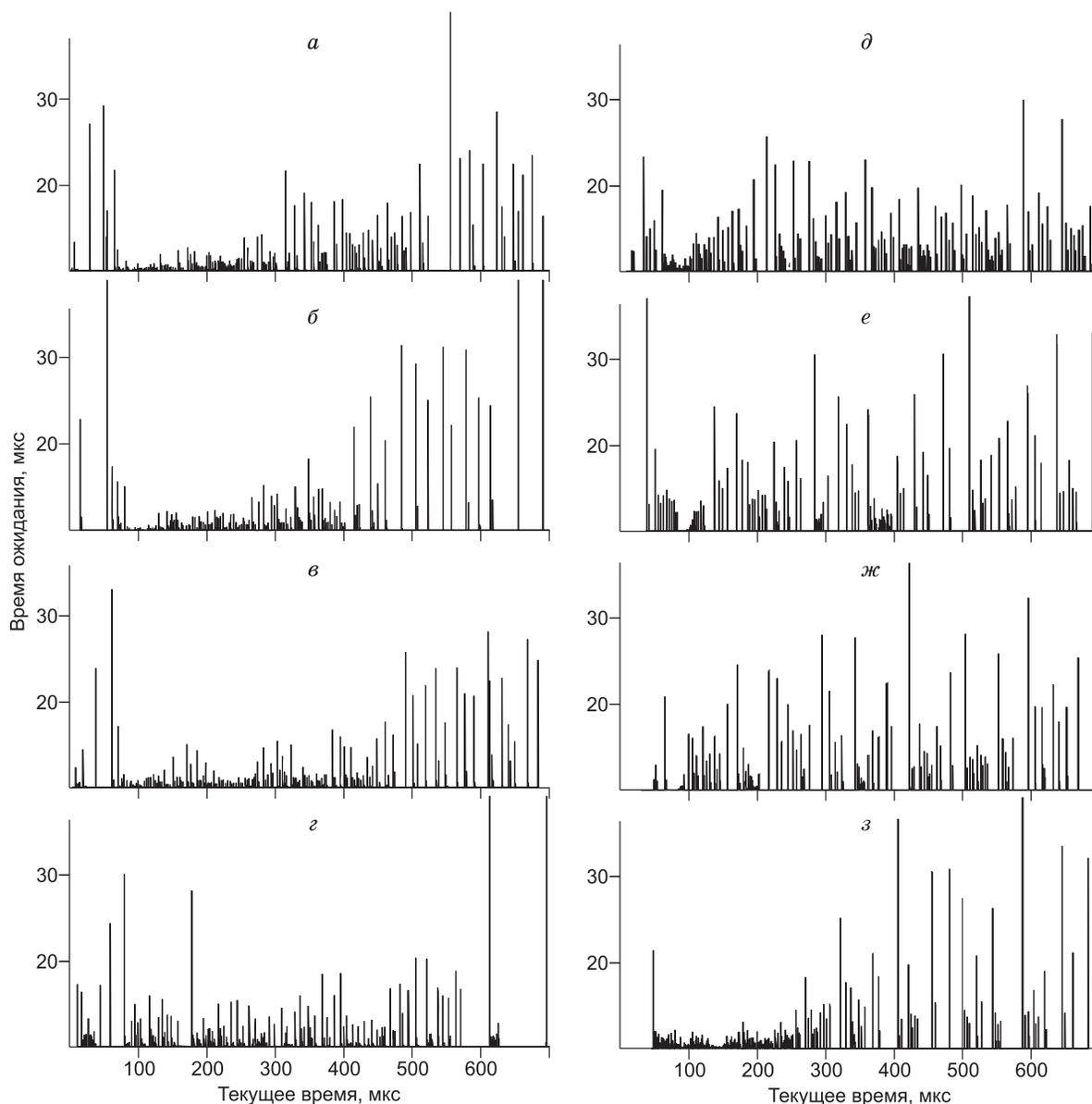


Рис. 4. Последовательность интервалов между сигналами АЭ (а—д) и ФЛ (е—з), превышающими уровень дискриминации.

а—з — см. на рис. 3.

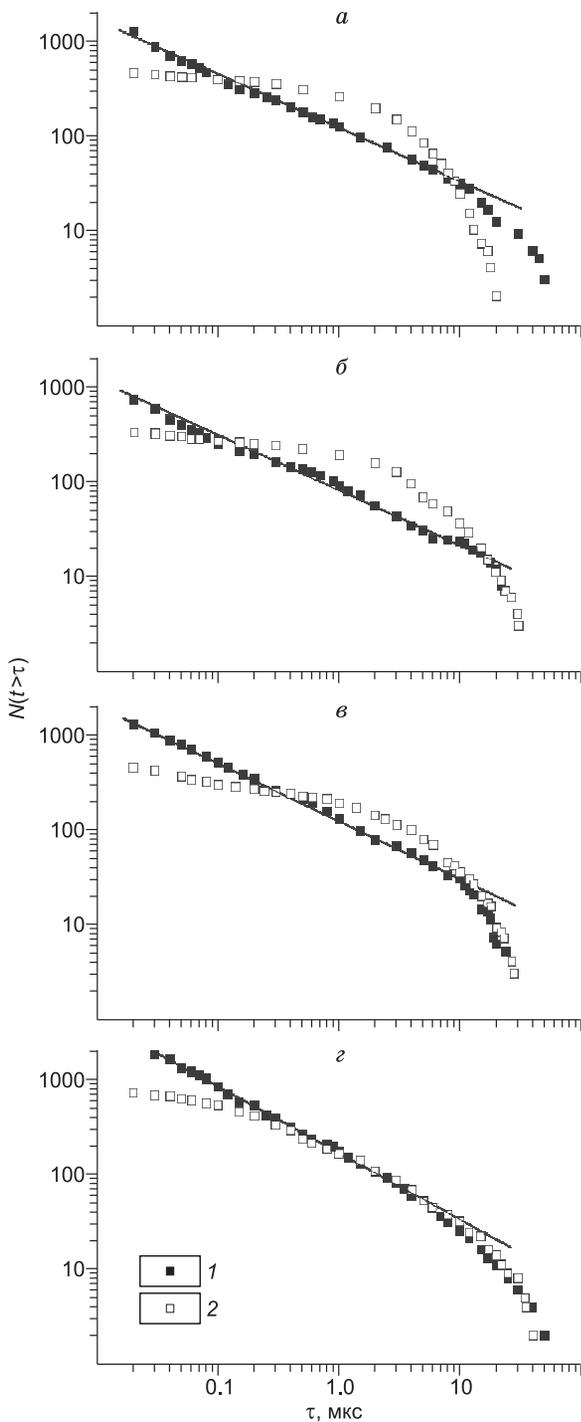


Рис. 5. Распределения времен ожидания сигналов АЭ (1) и ФЛ (2).

a—г — см. на рис. 3.

ние τ , $N(t > \tau)$. Поскольку единственным решением уравнения (1) является степенная функция, то самоподобное временное распределение событий должно удовлетворять условию:

$$N(t > \tau) \propto t^{-\gamma}. \quad (2)$$

Распределения типа (2) свидетельствуют о временной корреляции событий («памяти»), возникающей благодаря медленному (степенному) уменьшению влияния предшествующего события на последующие. В равновесной термодинамической системе «последствие» затухает по экспоненциальному закону, поскольку не поддерживается потоком энергии извне. Поэтому выявление степенных распределений позволяет определить степень отклонения системы от равновесного состояния, что, в принципе, дает определенные возможности для предсказания дальнейшего развития процесса [Гейликман, Писаренко, 1989].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Временные развертки интенсивности (квадрата амплитуды, A^2) сигналов АЭ и ФЛ из разрушаемых образцов гранитов и мрамора показаны на рис. 3. Можно видеть, что как акустический, так и световой сигналы запаздывают от момента касания грузом бойка примерно на 50 мкс. Это связано в основном с прохождением упругих волн через боек. Процесс разрушения завершается примерно через 600 мкс. Чтобы выделить сигналы, непосредственно связанные с образованием трещин (в случае АЭ) или разрывов химических связей (в случае ФЛ), в каждой временной серии задавался уровень дискриминации сигналов по интенсивности, исходя из фоновой эмиссии в конце серии. Интервалы между сигналами, превышающими порог дискриминации, составляли спектры времен ожидания отдельных событий разрушения (рис. 4). Как видно на рисунках, времена ожидания возрастают к концу процесса.

На рис. 5 в двойных логарифмических координатах приведены функции распределения $N(t > \tau)$, которые были рассчитаны из спектров времен ожидания

(см. рис. 4). Диапазон значений τ включает область от минимального времени ожидания, доступного для измерений (10 нс), до максимального зарегистрированного значения (десятки микросекунд).

Зависимость параметра γ от величины зерна в гранитах и мраморе

Образец	Характерный размер зерна, мм	Параметр γ
Гранит:	крупнозернистый	5—7
	среднезернистый	2—3
	мелкозернистый	~ 1
Мрамор	< 0.5	0.709 ± 0.007

Можно видеть, что в распределениях всех образцов, полученных на основе данных АЭ, имеются логлинейные участки, отвечающие степенной зависимости (2), т.е. свидетельствующие о коррелированном во времени процессе разрушения. Величины показателя степени γ , определенные из наклона прямых, приведены в таблице. Наклон прямых растет при уменьшении зерна породы.

В то же время распределения интервалов между сигналами ФЛ не имеют линейных участков в двойных логарифмических координатах, т.е. события рождения свободных радикалов являются не коррелированными в указанном выше смысле.

ОБСУЖДЕНИЕ

Применив два метода регистрации возникающих дефектов на двух масштабных уровнях — микроскопическом и атомном — мы получили существенно различные результаты, наблюдая за одним и тем же процессом динамического разрушения. Образование трещин во всех изученных материалах происходило с хорошо выраженной корреляцией во времени, что проявилось в степенном распределении времен ожидания АЭ сигналов от растущих трещин. Следует отметить, что логлинейные участки зависимости $N(t > \tau) \propto \tau$ охватывают диапазон измерений от 10 нс (разрешение экспериментальной установки) до ~ 10 мкс, т.е. три порядка величины. Отступление от степенной зависимости для времен свыше 10—20 мкс, отвечающих появлению небольшого числа трещин на конечной стадии процесса, указывает на отсутствие корреляции между редкими событиями.

Действительно, механизм временной корреляции состоит в том, что зарождение нового дефекта происходит до того, как исчезнет динамическое возмущение среды от формирования предыдущего. Если между этими событиями имеется значительный временной разрыв, то «память» о предыдущем событии утрачивается, и разрозненные дефекты возникают независимо друг от друга.

Именно такая ситуация возникает при регистрации разрывов химических связей вне зоны активного разрушения методом ФЛ. Перестройка электронной структуры с образованием свободного радикала после разрыва межатомных связей составляет 10^{-11} — 10^{-12} с (т.е. порядка нескольких периодов тепловых колебаний атомов). Поэтому одиночные разрывы, возникающие на поверхности образцов, слишком далеко разнесены во времени, чтобы быть коррелированными между собой. Это проявляется в отсутствии логлинейных участков в распределении времен ожидания сигналов ФЛ.

Возвращаясь к данным АЭ, обратим внимание на тенденцию увеличения наклона прямых участков на графиках $N(t > \tau) \propto \tau$ при увеличении степени однородности материала (см. таблицу). Абсолютная величина параметра γ определяет относительный вклад больших и малых времен ожидания в их общее распределение: чем больше γ , тем меньше интервалы между сигналами АЭ. В нашем случае величина γ оказалась тем выше, чем меньше зерно материала. Это свидетельствует об увеличении частоты появления новых трещин в более однородной среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошо известно, что трещинообразование при компрессионной нагрузке горных пород является коррелированным во времени процессом. Представленные в этом сообщении результаты показывают, что динамическое (ударное) разрушение также обладает временной связностью появления отдельных трещин. Для лабораторных образцов гранитов «память» о росте предыдущей микротрещины сохраняется в течение примерно 10 мкс при общей длительности процесса разрушения $\sim 5 \cdot 10^2$ мкс. Особенности строения материалов влияют на частоту появления новых дефектов, но не нарушают временного самоподобия процесса.

Вместе с тем корреляция не отмечена на масштабном уровне разрывов межатомных связей на поверхности образцов. Сверхкороткое время перестройки электронной структуры исключает эффект «памяти», хорошо выраженный на уровне образования микротрещин.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 10-05-00256-а).

ЛИТЕРАТУРА

Абрамова К.Б., Русаков А.И., Семенов А.А., Щербаков И.П. Люминесценция металлов, возбуждаемая при быстром неразрушающем нагружении // ФТТ, 1998, т. 40, с. 957—965.

Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Кинетика эмиссии света, звука и радиоволн из монокристалла кварца после удара по его поверхности // ЖТФ, 2011, т. 56, с. 148—151.

Гейликман М.Б., Писаренко В.Ф. О самоподобии в геофизических системах // Дискретные свойства геофизической среды / Ред. М.А. Садовский. М., Наука, 1989, с. 109—130.

Геншафт Ю.С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия // Физика Земли, 2009, № 8, с. 4—12.

- Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С., Томилин Н.Г.** Двухстадийная модель разрушения горных пород // Физика Земли, 1994, вып. 10, с. 47—53.
- Кадомцев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С.** Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // ФТТ, 2011, т. 53, вып. 9, с. 47—53.
- Макаров П.В.** Эволюционная природа деструкции твердых тел и сред // Физическая мезомеханика, 2007, т. 10, вып. 3, с. 23—38.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Завьялов А.Д.** Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический процесс // Физика Земли, 1995, № 1, с. 38—58.
- Щербаков И.П., Куксенко В.С., Чмель А.Е.** Неэкстенсивный статистический анализ высокоскоростной регистрации ударного разрушения твердых тел // Письма в ЖЭТФ, 2011, т. 94, вып. 5, с. 410—413.
- Яковицкая Г.Е.** Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. Новосибирск, Параллель, 2008, 315 с.
- Abaimov S.G., Turcotte D.I., Shcherbakov R., Rundle J.B.** Recurrence and interoccurrence behavior of self-organized complex phenomena, *Nonlin // Proc. Geophys.*, 2007, v. 14, p. 455—464.
- Alava M.J., Nukala P.K.N.N., Zapperi S.** Statistical models of fracture // *Adv. Phys.*, 2006, v. 55, p. 349—476.
- Bouchaud E.** Scaling properties of cracks // *J. Phys.: Condens. Matter.*, 1997, v. 9, p. 4319—4344.
- Chmel A., Smirnov V.** Correlated energy exchange in drifting sea ice // *Intern. J. Oceanography*, 2011, ID 316289 (1—6).
- Chmel A., Smirnov V., Golovanov O.** Variability of scaling parameters in non-conservative systems: geophysical aspect // *Physica A*, 2010, v. 389, p. 2617—2627.
- Davidson J., Stanchits S., Dresen G.** Scaling and universality of rock fracture // *Phys. Rev. Lett.*, 2007, v. 98, p. 12502 (1—4).
- Enescu B., Ito K.** Some precursory phenomena of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) earthquake: seismicity, b-value and fractality // *Tectonophysics*, 2001, v. 338, p. 297—314.
- Kuksenko V., Tomilin N., Chmel A.** The role of driving rate in scaling characteristics of rock fracture // *JSTAT*, 2005, P06012 (1—13).
- Kuksenko V., Tomilin N., Chmel A.** The rock fracture experiment with a drive control: a spatial aspect // *Tectonophysics*, 2007, v. 431, p. 123—129.
- Lei X., Satoh T.** Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage // *Tectonophysics*, 2007, v. 431, p. 97—111.
- Mandelbrot B.B.** Fractal analysis and synthesis of fracture surface roughness and related forms of complexity and disorder // *Intern. J. Fracture*, 2006, v. 138, p. 13—17.

*Рекомендована к печати 23 апреля 2012 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
15 декабря 2011 г.*