

05:08

## Отклонение от закона Гутенберга—Рихтера

© Е.Е. Дамаскинская, А.Г. Кадомцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург  
E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2012 г.

Проведен анализ распределений по энергии сигналов акустической эмиссии (АЭ) на двух масштабных уровнях: при деформировании гранитных образцов и при измерениях, проводимых на действующем горном предприятии. Обнаружено, что в случае локализованного разрушения вид распределения, как и принято считать, — степенной, при дисперсном разрушении распределение сигналов АЭ по энергии имеет экспоненциальный вид. Анализ функционального вида распределения уже на ранних этапах нагружения позволяет выделить пространственную область образца, в которой в дальнейшем произойдет локализация дефектообразования.

В середине XX века Гутенберг и Рихтер установили, что распределение числа землетрясений по магнитуде (энергии) описывается степенной функцией [1]. Эта зависимость получила название „закон Гутенберга—Рихтера“, а график, построенный в двойных логарифмических координатах, — „график повторяемости землетрясений“. В дальнейшем большое число исследователей [2,3] занималось анализом графика повторяемости, построенного для различных регионов. 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 [4]. Во всех работах основное внимание уделялось изменению угла наклона графика [2–4].

Однако при анализе экспериментов по деформированию образцов горных пород мы столкнулись с тем, что распределение сигналов акустической эмиссии по энергии не всегда удается аппроксимировать степенной функцией. В [5] высказывались предположения о том, что хаотичному и локализованному накоплению дефектов в образцах под нагрузкой соответствует различный функциональный вид распределения

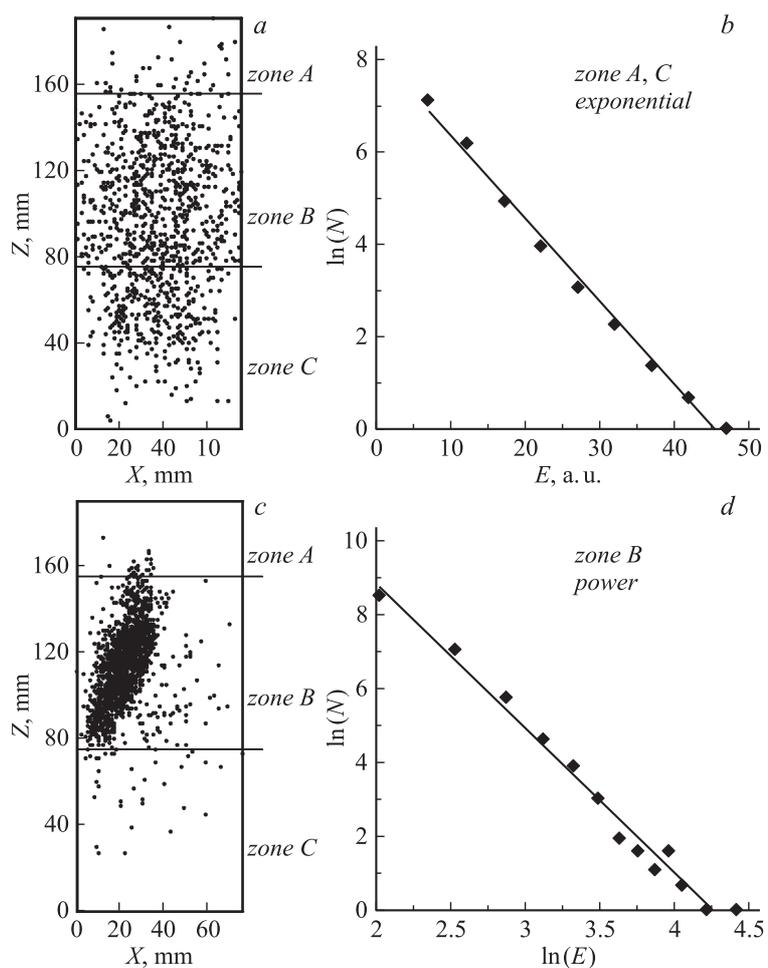
дефектов по размерам. В связи с этим была поставлена задача выяснить: 1) условия, при которых распределение по энергии аппроксимируется степенной функцией; 2) существуют ли условия, при которых распределение имеет функциональный вид, отличный от степенного.

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

В экспериментах на установке, позволяющей управлять деформацией и давлением воды (подробнее описано в [6,7]), подвергались нагружению цилиндрические образцы гранита ( $h = 190.5 \text{ mm}$ ,  $d = 76.2 \text{ mm}$ ). Образцы деформировали в условиях постоянного всестороннего сжатия осевого нагружения. Наблюдение за трещинообразованием проводилось с помощью регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ). Известно, что основным источником АЭ в горных породах являются образующиеся трещины [8] и существует связь между параметрами трещин и сигналов АЭ [9]. Точность определения координат гипоцентров источников АЭ составила  $\approx 4\%$  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. Важно отметить, что приведенная амплитуда не зависит от геометрии расположения пьезообразователей и может служить энергетической характеристикой источника сигнала. Аналогичная база данных получена в результате измерений, проводимых ИГД РАН г. Хабаровска на глубоких горизонтах месторождения „Антей“.

В работе приведены характерные для серии экспериментов результаты. Подробный пространственно-временной анализ развития разрушения в экспериментах был проведен ранее в [10]. Было установлено, что разрушение происходит по двухстадийному механизму: вначале дефекты образуются дисперсно (хаотично), затем наблюдается локализация, формируется очаг, развитие которого приводит к макроразрыву.

В данной работе проведен детальный анализ распределений сигналов АЭ, зарегистрированных в различных пространственных областях образца и на разных этапах нагружения. На рис. 1, а показано пространственное распределение координат гипоцентров сигналов АЭ



**Рис. 1.** Пространственный и энергетический анализ разрушения гранитных образцов. Проекция координат гипоцентров источников АЭ: *a* — начальная стадия нагружения (сигналы АЭ, зарегистрированные в период времени от начала нагружения до 0.6 долговечности образца); *c* — локализованное разрушение (сигналы АЭ, зарегистрированные в период времени от 0.9 долговечности вплоть до разрушения образца). Распределения числа  $N$  сигналов акустической эмиссии по энергии  $E$  (период времени от начала нагружения до 0.6 долговечности образца): *b* — zones A, C; *d* — zone B.

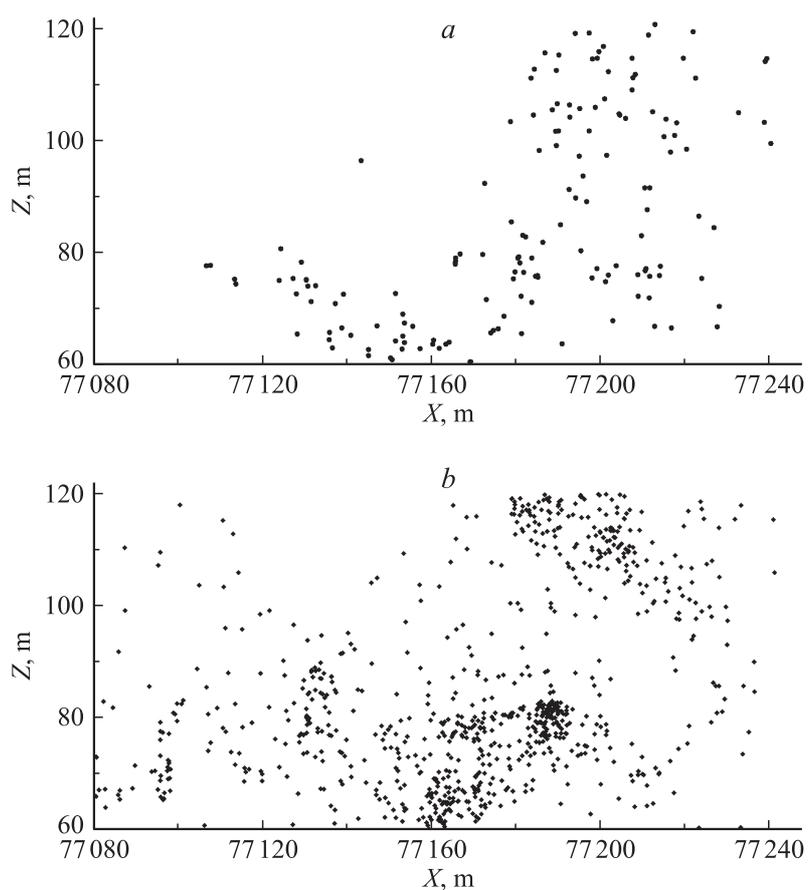
(по существу — распределение образующихся дефектов) на начальной стадии нагружения ( $\sim 0.5$ – $0.6$  времени жизни образца). Видно, что дефекты образуются равномерно по образцу. Распределения по энергии сигналов АЭ, соответствующих данным дефектам, в различных пространственных областях образца приведены на рис. 1, *b*. Установлено что в большей части объема образца (рис. 1, *a*, zone A, C) распределение описывается экспоненциальной функцией (рис. 1, *b*). Однако явно выделяется область (рис. 1, *a*, zone B), в которой распределение аппроксимируется степенной функцией (рис. 1, *d*).

Если же построить распределение для сигналов из всего объема образца, то его не удастся удовлетворительно аппроксимировать ни степенной, ни экспоненциальной функцией. Это означает, что имеет место суперпозиция функций. Именно пространственное „сканирование“ позволило найти области образца с явно выраженным различным видом энергетического распределения.

На завершающем этапе нагружения наблюдается локализация дефектообразования, и распределение по энергии сигналов АЭ, естественно, имеет степенной вид. Пространственное распределение координат гипоцентров этих сигналов АЭ (рис. 1, *c*) явно демонстрирует, что локализация дефектообразования происходит именно в той области образца (zone B), в которой еще на ранних этапах энергетическое распределение имело степенной вид.

Для проверки предположения, что при дисперсном разрушении распределение всегда имеет экспоненциальный вид, был проведен анализ экспериментов с водонасыщенными образцами, в которых, как было показано [10], на протяжении всего эксперимента не наблюдается локализация, образование дефектов происходит дисперсно вплоть до макроразрушения. Мы установили [11], что на протяжении всего эксперимента и в любых пространственных областях распределение сигналов АЭ по энергии сохраняет экспоненциальный вид и не переходит в степенную функцию.

На большом масштабе разрушения (действующее горное предприятие) также был проведен анализ изменения функционального вида распределения энергии сигналов АЭ. Оказалось, что на начальных этапах разрушения распределение аппроксимируется экспоненциальной функцией (вид которой аналогичен приведенному на рис. 1, *b*). В этот период времени локализации дефектов не наблюдается (рис. 2, *a*). По мере накопления дефектов функциональный вид распределения



**Рис. 2.** Пространственный анализ разрушения горного массива. Проекция координат гипоцентров источников АЭ: *a* — дисперсное разрушение; *b* — локализованное разрушение.

изменился и стал степенным (аналогично рис. 1, *d*). При этом на пространственном распределении дефектов отчетливо видна локализация (рис. 2, *b*). Можно предположить, что система перешла в „опасное“ состояние самоорганизованной критичности [12], при котором возможно

образование крупных дефектов, сопровождаемое выделением большой энергии.

Функциональный вид распределения сигналов АЭ по энергии связан с характером образования дефектов, а именно: при некоррелированном дефектообразовании распределение имеет экспоненциальный вид, если же образование дефектов происходит коррелированно, то распределение аппроксимируется степенной функцией.

Можно предположить, что на характер образования дефектов влияет не только величина внешней нагрузки, но и структура материала, в том числе дефекты типа трещин, пор, капилляров, существовавшие до нагружения. Возможно, именно дефектная структура и определяет место зарождения макроразрыва.

Таким образом, пространственно-временной анализ результатов лабораторных экспериментов и натурных измерений позволил сделать следующий вывод. Распределение сигналов АЭ по энергии не всегда аппроксимируется степенной функцией. В некоторых случаях распределение является экспоненциальным, а в других — представляет собой суперпозицию степенной и экспоненциальной функций.

1. Высказано предположение о том, что функциональный вид распределения определяется характером образования дефектов: независимым или коррелированным.

2. Анализ всех полученных результатов говорит о том, что при дисперсном разрушении распределение сигналов АЭ по энергии имеет экспоненциальный вид, в то время как в области локализации разрушения распределение становится степенным.

3. В случае, когда при анализе сигналов из всего объема образца не удается аппроксимировать распределение ни экспоненциальной, ни степенной функцией, можно (путем пространственного „сканирования“) выделить пространственные области, в которых распределение будет аппроксимироваться только одной из функций.

4. 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 РАН г. Хабаровска) за предоставленную базу данных, полученную при мониторинге рудника „Глубокий“ ОАО „ППГХО“.

**Список литературы**

- [1] *Gutenberg B., Richter C.F.* Seismicity of the Earth and Associated Phenomena / 2nd ed. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1954. 284 p.
- [2] *Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smironov V.B., Lockner D.A.* // Tectonophysics. 1997. V. 277. P. 57–81.
- [3] *Schorlemmer S., Wiemer S., Wyss M.* // J. Geophysical Research. 2004. V. 109. B12307, doi:10.1029/2004JB003234. P. 17.
- [4] *Kei Katsumata* // E-LETTER Earth Planets Space. 2006. V. 58. P. e49–e52.
- [5] *Гиляров В.Л., Варкентин М.С., Корсуков В.Е., Корсукова М.М., Куксенко В.С.* // ФГТ. 2010. Т. 52. В. 7. С. 1311–1315.
- [6] *Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A.* // Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks / Eds B. Evans, T.-F. Wong. London: Academic Press, 1992. P. 3–31.
- [7] *Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V.* // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. V. 93. N 4. P. 1803–1822.
- [8] *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С. 2526–2530.
- [9] *Куксенко В.С., Ляшков А.И., Мирзоев К.М., Негматуллин С.Х., Станчиц С.А., Фролов Д.И.* // ДАН СССР. 1982. Т. 264. № 4. С. 846–848.
- [10] *Кадоццев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С.* // ФГТ. 2011. Т. 53. В. 9. С. 1777–1782.
- [11] *Кадоццев А.Г., Гиляров В.Л., Дамаскинская Е.Е., Рассказов И.Ю.* // XX Петербургские чтения по проблемам прочности. СПб.: Соло, 2012. Ч. 1. С. 62.
- [12] *Bak P.* How Nature Works. N.Y.: Springer-Verlag, 1986.