

УДАРНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГРАНИТОВ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 20—500 °С**И.П. Щербаков, А.Е. Чмель***Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, Россия*

Накопление гипоцентров и распространение трещин в деформированных горных породах сопровождается генерацией упругих волн, в частности, в области акустических частот. Эти процессы имеют место как в тектонических структурах, так и в лабораторных условиях. Поэтому данные лабораторных экспериментов по акустической эмиссии (АЭ) из нагруженных образцов часто используются для интерпретации природных сейсмических явлений. Однако лабораторные опыты обычно проводятся при комнатной температуре, тогда как температура горных пород на глубине формирования очагов землетрясений может достигать нескольких сотен градусов Цельсия. В этом сообщении приведены результаты исследования АЭ из гранитов нескольких видов, подвергнутых ударному разрушению при различной температуре. Было найдено, что распределение энергии во временных рядах импульсов АЭ из мелкозернистого гранита при температурах от 20 до 500 °С описывается соотношением, подобным закону Гуттенберга—Рихтера; для средне- и крупнозернистых гранитов это соотношение выполняется только в диапазоне температур 20—300 °С. При температурах выше 300 °С два последних материала проявили случайное (пуассоновское) распределение энергии в импульсах АЭ.

*Граниты, динамическое разрушение, акустическая эмиссия, температурная зависимость.***IMPACT FRACTURE OF GRANITES AT TEMPERATURES FROM 20 TO 500 °C****I.P. Scherbakov and A.E. Chmel'**

Earthquake nucleation and fracture propagation in deformed rocks generate elastic waves, within acoustic frequencies. Strain-induced acoustic waves appear both in field tectonic structures and in laboratory samples, thus making laboratory acoustic emission (AE) data from load tests suitable to interpret natural seismic processes. However, laboratory tests are commonly run at room temperature, while the natural rocks at the earthquake origin depths are as hot as hundreds of degrees centigrade. We report AE data for thermally and mechanically loaded granites subjected to impact fracture at different temperatures. The energy distribution in the time series of acoustic signals emitted from fine-grained granite fits a power law of the type of the Gutenberg—Richter relationship at temperatures from 20 to 500 °C. Medium- and coarse-grained samples behave in this way only within 300 °C but show a Poissonian (random) AE energy distribution above 300 °C.

*Granite, impact fracture, acoustic emission, temperature dependence***ВВЕДЕНИЕ**

Многочисленные лабораторные исследования разрушения горных пород методами акустической эмиссии (АЭ) и эмиссии электромагнитных сигналов показали, что зависимость числа импульсов от интенсивности импульсов в определенном диапазоне энергий (E) следует степенному закону, который в логарифмической форме идентичен закону Гуттенберга—Рихтера $\lg_{10} N(M >) \propto -bM$, где N — число землетрясений с магнитудой, превышающей величину M (величина M пропорциональна $\lg E$) [Rabinovich et al., 2002; Kuksenko et al., 2005; Lei, Satoh, 2007]. Это обстоятельство для многих авторов послужило стимулом для использования данных АЭ экспериментов для интерпретации закономерностей природной сейсмической активности [Scholz, 1968; Zavyalov, Sobolev, 1988; Смирнов и др., 1995; Amitrano, 2006; Davidsen et al., 2007; Геншафт, 2009]. В определенной степени такой подход оправдан также тем, что в основе любых крупномасштабных явлений в сжатых породах лежит зарождение, накопление и кластеризация микроскопических дефектов.

Однако обычно эксперименты по компрессионному разрушению геоматериалов осуществляются в условиях, не вполне адекватных реальным условиям сейсмического процесса, поскольку формирование очагов землетрясений происходит преимущественно на глубине десятков километров, где зарождение гипоцентров происходит при повышенной температуре.

С целью выявления возможного влияния температуры окружающей среды на характер разрушения горных пород в настоящей работе были изучены временные ряды импульсов АЭ из образцов различных гранитов при их динамическом (ударном) разрушении при температуре от 20 до 500 °С, т.е. в

области температур ниже фазового перехода $\alpha \rightarrow \beta$ в кварце, происходящего при 573 °С. В проведенных опытах локальные повреждения поверхности образцов производились падающим грузом.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Объектами исследования были образцы гранитов трех видов, существенно различных по среднему размеру зерен. Два гранита из финляндских карьеров (Рапакиви и Грей куру) имели размер зерна 5—7 и 2—3 мм соответственно; гранит Вестерли имел зерно со средним диаметром ~ 0.8 мм, причем наиболее крупные частицы не превышали 1.2 мм. Состав и некоторые физико-механические свойства образцов гранитов приведены в табл. 1.

Образцы вырезали в форме блоков размером примерно 15 × 20 × 20 мм.

Схема опытов представлена на рис. 1. Локализованное разрушение гранита производилось грузом весом 100 г, падающим с высоты 10 см на стальной боек, установленный на поверхность образца. Повреждение поверхности представляло собой лунку диаметром 1—2 мм и глубиной ~ 0.5 мм.

Для регистрации АЭ на плоской боковой поверхности заостренного бойка прикрепляли пьезодатчик. Такая схема регистрации (в отличие от традиционной практики установки датчика на образец) позволила, во-первых, обеспечить теплоизоляцию пьезодатчика от нагретого образца, а во-вторых, уменьшить фоновый сигнал АЕ от микротрещин, возникающих в гранитах вследствие термических напряжений [Yong, Wang, 1980; Keshavarz et al., 2010] при отсутствии внешней нагрузки.

Напряжение на выходе аналогово-цифрового преобразователя записывались в память компьютера с шагом 10 нс. Максимальная частота регистрируемых сигналов составляла 1 МГц. Низкочастотная цифровая фильтрация на уровне 50 кГц позволяла исключить как сигнал от первичной упругой волны, проходящей через ударник, так и паразитные колебания образца и всей установки. Для исключения фонового акустического шума (например, за счет многократного отражения упругих волн от стенок образца) применялась дискриминация сигналов по амплитуде.

Опыты проводили при температурах образцов от 20 до 500 °С, температура измерялась дистанционно с помощью инфракрасного пирометра CONDTRON IR-T4.

На рис. 2 показаны временные развертки импульсов АЭ из трех различных гранитов. Отсчет времени начинали с момента соприкосновения груза с бойком. Смещение момента появления сигналов АЭ от начала координат обусловлено временем прохождения упругой волны через ударник в образец и от ответных акустических сигналов до пьезодатчика.

Можно видеть, что во всех временных рядах имеется несколько узких пиков на фоне множества значительно менее интенсивных сигналов. Как отмечалось ранее [Щербаков и др., 2011], доминирующие пики связаны с формированием «макроскопического» (в масштабе лабораторного образца) поврежде-

ния поверхности, а менее интенсивные сигналы возникают при образовании гипоцентров микроскопического масштаба, генерируемых по всему объему образца упругой волной от ударника. Полное время генерации сигналов АЭ составляло около 300 мкс в образцах средне- и крупнозернистых гранитов, и примерно 600 мкс в мелкозернистом граните.

Интенсивность (квадрат амплитуды сигнала, A^2) АЭ возрастала с температурой, и при 500 °С примерно на порядок величины превышала интенсивность сигналов при комнатной температуре.

Интенсивность АЭ пропорциональна энергии, выделяемой при образовании микро- и макроскопических повреждений. Поэтому измерения интенсивности были использованы для построения распределений энергии, высвобождаемой при образовании гипоцентров и росте трещин. Распределения были построены в форме зависимостей $\lg N(E > E')$ от E' ,

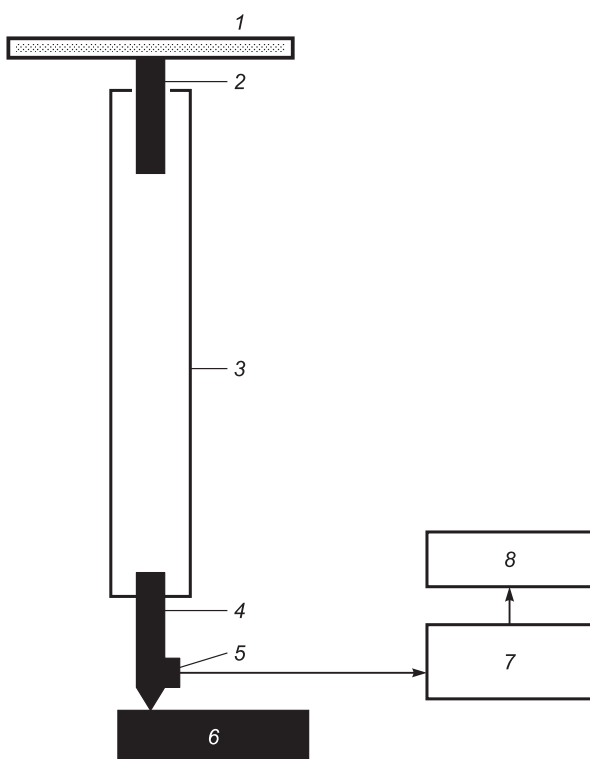


Рис. 1. Схема установки для регистрации АЭ при ударном разрушении.

1 — электромагнит; 2 — груз; 3 — направляющий кожух; 4 — боек; 5 — пьезоэлемент; 6 — образец; 7 — конвертер АЦП-АСК-3106; 8 — ПК.

Таблица 1. Состав и некоторые физико-механические свойства образцов гранитов

Гранит	Состав, %				Плотность, кг/м ³	Размер зерна, мм
	Ортоклаз	Олигоклаз	Кварц	Прочее		
Рапакиви	40	19	30	11	2660	3—5
Грей куру	38	20	31	11	2700	~ 2
Вестерли	32	33	28	7	2630	0.8

где N число импульсов АЭ с энергией, превышающей величину E' . Полученные графики показаны на рис. 3.

Для образцов крупно- и среднезернистого гранитов Рапакиви и Грей куру соответственно распределения энергии в сигналах АЭ при температурах образцов до 300 °С, существенно отличны от распределений при более высоких температурах. В условно «низкотемпературной» области все распределения энергии в этих гранитах имеют лог-линейные участки, отвечающие соотношению типа Гуттенберга—Рихтера:

$$\lg N(E > E') \propto -b \lg E' \quad (1)$$

($\lg E$ пропорционален магнитуде сигнала) или в степенной форме:

$$N(E > E') \propto E'^{-b}. \quad (1a)$$

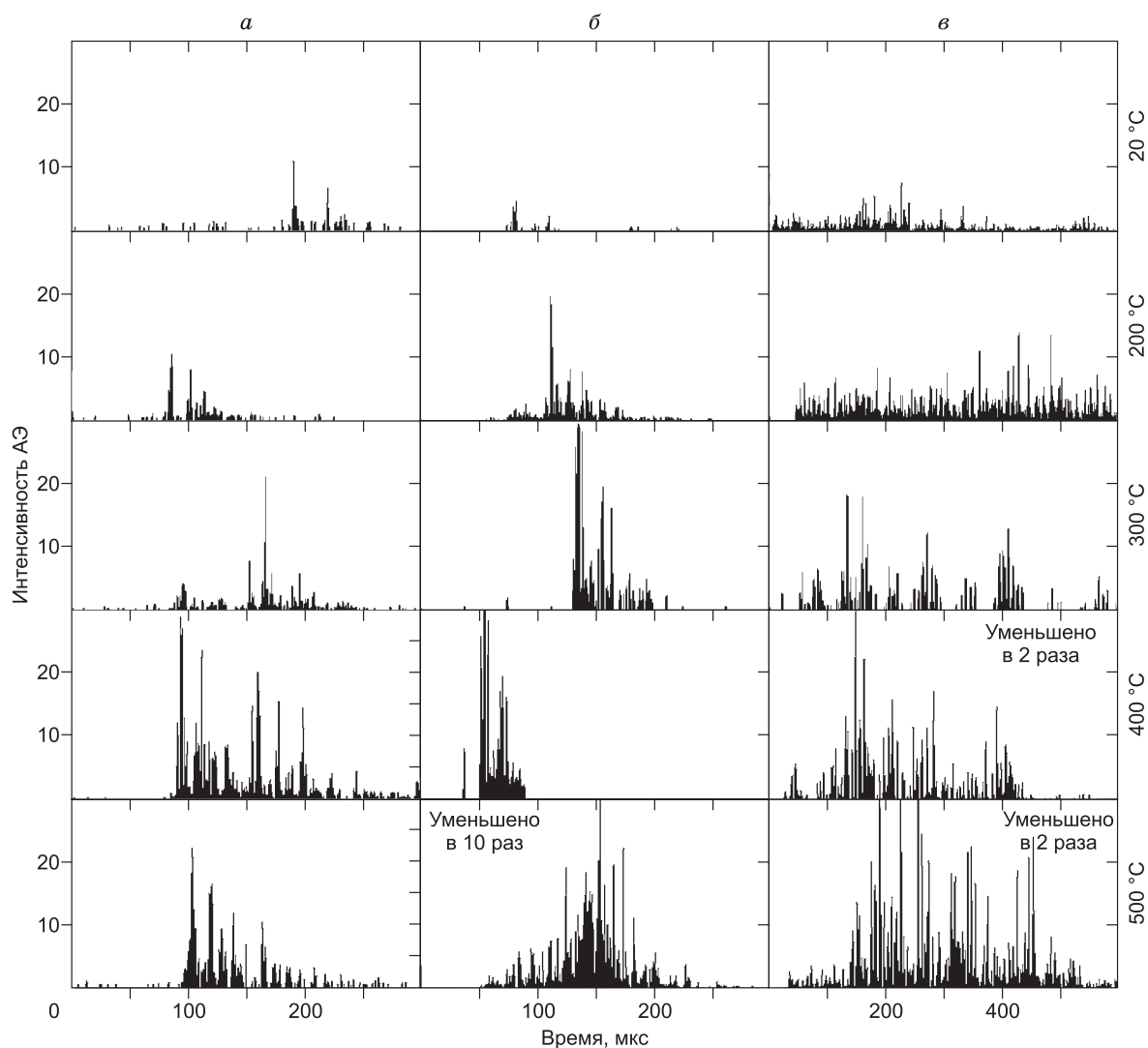


Рис. 2. Временные развертки интенсивности (A^2) сигналов АЭ из образцов крупно- (а), средне- (б) и мелкозернистого (в) гранитов при различной температуре образцов.

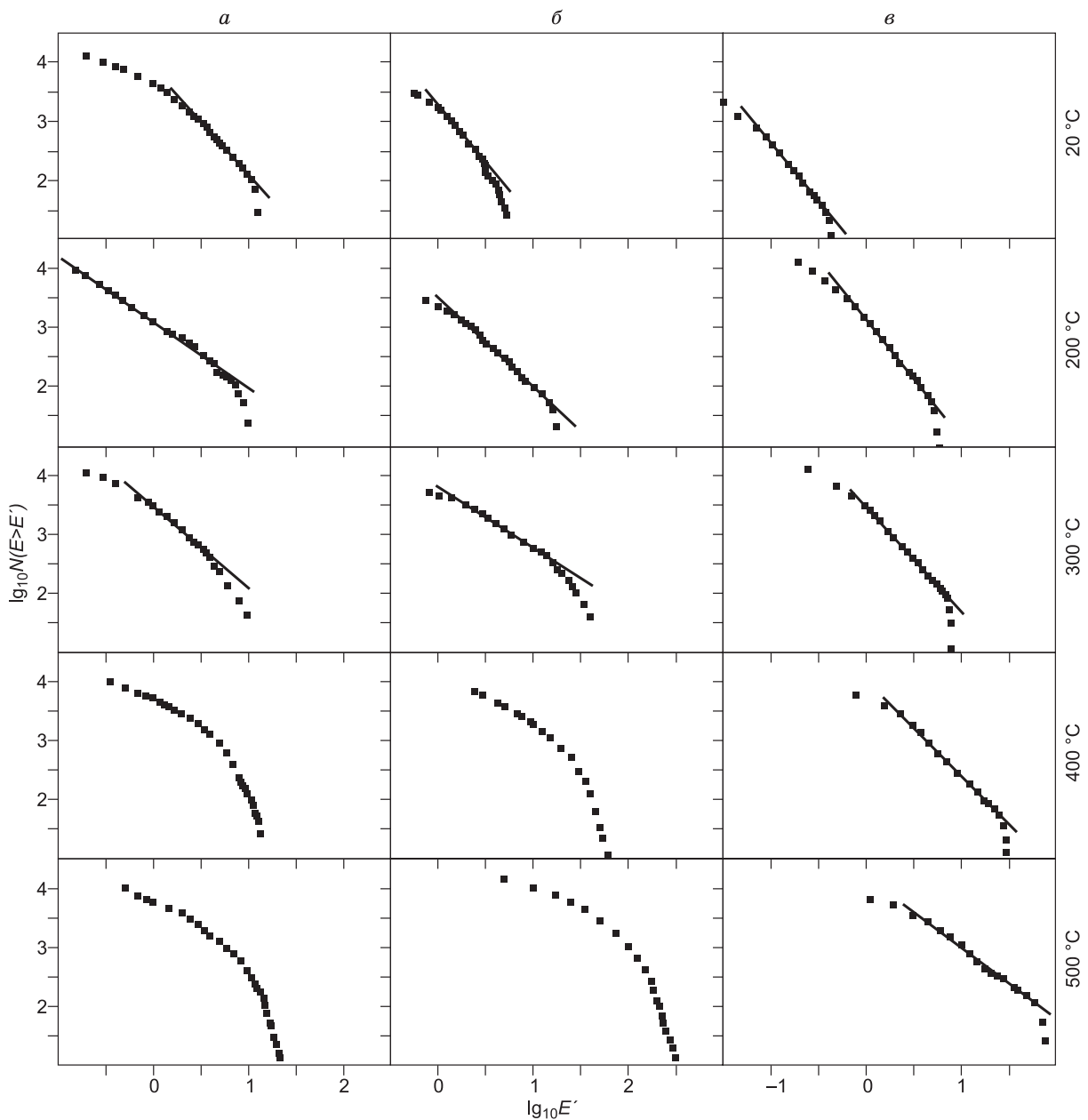


Рис. 3. Распределения энергии в импульсах АЭ и аппроксимация лог-линейных участков уравнением (1) (прямые линии).

а — гранит Рапакиви; *б* — гранит Грей куру; *в* — гранит Вестерли. Двойные логарифмические координаты.

В диапазоне 400—500 °С соотношения (1) и (1а) для этих гранитов не выполняются (см. рис. 3, *а*, *б*), однако будучи перестроенными в полулогарифмических координатах (с линейным масштабом по оси энергий, рис. 4), графики зависимости $\lg N(E > E')$ от E' хорошо ложатся на прямые линии, отвечающие соотношению

$$\lg N(E > E') \propto -aE' \quad (2)$$

или

$$N(E > E') \propto \exp(-aE'), \quad (2a)$$

где a — постоянная (наклон прямой на графике). Экспоненциальное соотношение пуассоновского типа (2а) указывает на случайный характер возникновения источников АЭ.

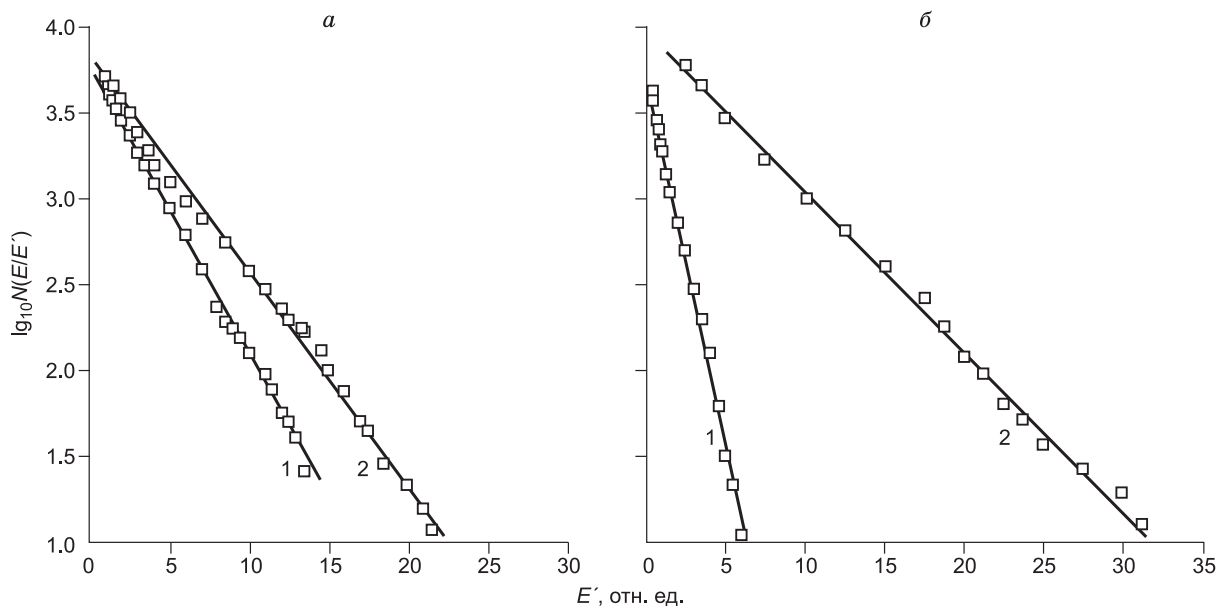


Рис. 4. Распределения энергии в импульсах АЭ, не имеющие лог-линейных участков на рис. 3, и их аппроксимация уравнением (2).

a — гранит Рапакиви; *б* — гранит Грей куру. Температура образцов 400 °С (1) и 500 °С (2). Полулогарифмические координаты.

В образце мелкозернистого гранита Вестерли степенной закон (1а) выполняется во всем диапазоне измерений (20—500 °С).

Во всех гранитах наклон лог-линейных участков зависимости (параметр *b*) проявляет тенденцию к уменьшению с ростом температуры (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Степенная зависимость (1а) указывает на масштабную инвариантность энерговыделения из деформируемого и разрушаемого гранита, поскольку функция $N(E)$ является единственным решением уравнения масштабирования

$$N(\lambda E) = \lambda^{-b}N(E), \tag{3}$$

где λ — масштабный фактор; b — параметр масштабирования. Масштабная инвариантность является принципиально кооперативным явлением, которое в нагруженном твердом теле возникает вследствие коррелированного накопления повреждений, т.е. в том случае, когда область воздействия каждого нового дефекта на окружающую среду (радиус корреляции) значительно превышает размер самого дефекта. Именно «дальние» взаимодействия между гипоцентрами приводят к появлению фрактальных структур.

Таблица 2. Величина параметра *b* (наклон прямых линий в распределениях энергии, показанных на рис. 3) при различных температурах образца

Температура, °С	Гранит, размер зерна		
	Рапакиви, 5—7 мм	Грей куру, 2—3 мм	Вестерли, 0.8 мм
20	1.67 ± 0.03	1.95 ± 0.03	2.00 ± 0.04
200	1.17 ± 0.03	1.70 ± 0.03	1.92 ± 0.04
300	1.36 ± 0.04	1.06 ± 0.01	1.76 ± 0.03
400	—	—	1.64 ± 0.02
500	—	—	1.25 ± 0.05

Примечание. Значение погрешности, указанное в таблице, относится к каждой конкретной серии АЭ импульсов; погрешность определения усредненного параметра *b* по разбросу при повторных измерениях образцов при неизменной температуре была выше примерно в 2 раза.

Наклон лог-линейных зависимостей в экспериментальных распределениях (параметр b) характеризует соотношение событий с большим и малым энерговыделением — чем меньше наклон, тем больше крупных событий. Обнаруженное уменьшение наклона прямых отрезков на графиках рис. 3 при увеличении температуры образцов (в тех случаях, когда лог-линейные участки имеют место) означает увеличение интенсивности накопления повреждений. Этот результат находится в согласии с отмечавшимся ранее [Mori, Abercrombie, 1997; Gerstenberger et al., 2001] эффектом уменьшения величины параметра b в сериях землетрясений при увеличении глубины расположения их очага. Как в случае лабораторных испытаний, так и в реальных природных условиях, указанная тенденция изменения величины b может быть объяснена уменьшением прочности геоматериалов при повышении температуры.

Однако степенное распределение событий во всем температурном диапазоне наблюдалось только для мелкозернистого гранита Вестерли. При разрушении гранитов Рапакиви и Грей куру при температурах, превышающих 300 °С, обнаружено экспоненциальное распределение энергии, характерное для случайных, некоррелированных событий. Отсутствие коррелированного разрушения может быть связано с рядом факторов.

Во-первых, повышение температуры горной породы вызывает одновременно с уменьшением прочности также увеличение ее пластичности [Liang et al., 2011; Wang et al., 2011]. Микропластическая деформируемость пород является одной из физических причин нелинейных эффектов в сейсмике [Машинский, 1994; Mashinskii, 2012]. Изменение пластических свойств при нагревании гранитов связано с возникновением микротрещин из-за термических напряжений на границах кристаллов с отличающимися коэффициентами теплового расширения (КТР) [Keshavarz et al., 2010]. Этот эффект зависит от состава породы. В частности, ортоклаз имеет примерно вдвое более низкий КТР, чем олигоклаз и кварц. Поскольку в граните Вестерли соотношение содержания ортоклаза, с одной стороны, и олигоклаза и кварца, с другой, — вдвое ниже, чем в обоих финляндских гранитах (см. табл. 1), можно ожидать, соответственно, менее значительного увеличения пластичности при его нагревании.

При высокой степени пластичности «дальние» взаимодействия между вновь образующимися трещинами невозможны, потому что воздействие дефектов сплошности на окружающую среду осуществляется посредством упругих волн, генерируемых при их зарождении и разрастании [Kuksenko et al., 2007; Telesca, Lovallo, 2008]. Поэтому при достаточно высокой температуре накопление гипоцентров может происходить независимо друг от друга, что и проявляется в случайном распределении энергии в АЭ импульсах.

Во вторых, сравнение распределений в мелкозернистом граните, с одной стороны, и в средне- и крупнозернистом гранитах, с другой, — показывает, что при повышенных температурах определенную роль в установлении коррелированного либо стохастического характера процесса играет структурный фактор.

Известно [Kusunose et al., 1991], что на формирование фрактальных структур при компрессионном разрушении гранитов влияет размер зерен. Авторы цитируемой работы, проведенной методом АЭ, обнаружили, что в граните с размером зерна ~ 1 мм фрактальная конфигурация гипоцентров одинакова при любых расстояниях между ними, тогда как в граните с размером частиц ~ 5 мм наблюдалось изменение фрактальной размерности для гипоцентров, расстояние между которыми превышало геометрический размер зерен материала.

Этот результат, а также представленные в настоящей работе данные о влиянии размера неоднородностей на характер разрушения гранитов при повышении температуры, по-видимому, связаны с тем, что в мелкозернистых породах разрушение происходит преимущественно по границам зерен, тогда как при большом размере частиц возрастает вероятность зарождения трещин в их объеме. Взаимодействия таких «внутренних» дефектов ослаблено наличием границ между частицами материала, что при определенных условиях приводит к некоррелированному накоплению гипоцентров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистические параметры временных рядов импульсов АЭ, генерируемых при динамическом разрушении гранитов, проявляют температурную зависимость. При повышении температуры разрушаемого образца происходят следующие изменения в распределениях интенсивностей импульсов, которые пропорциональны энергиям образования гипоцентров:

1. Интенсивность АЭ растет с увеличением температуры образца.

2. Интенсивности импульсов АЭ распределены по степенному закону во всем температурном диапазоне измерений (20—500 °С) для мелкозернистого гранита Вестерли, но в средне- и крупнозернистых гранитах (Рапакиви и Грей куру соответственно) степенное распределение энергий импульсов имело место только при температурах, не превышающих 300 °С. Степенное распределение событий характерно для кооперативных процессов в неравновесных системах.

3. При температурах 400—500 °С распределение энергий в средне- и крупнозернистом гранитах имело характер пуассоновского распределения для случайных дискретных событий.

4. В областях выполнения степенных зависимостей числа импульсов АЭ от энергии в импульсе наблюдалось уменьшение величины параметра b в соотношении $\lg N(E > E') \propto -b \lg E'$ с ростом температуры опыта. Эта тенденция связана с увеличением числа более крупных локальных повреждений при повышении температуры гранита.

Указанные особенности динамического разрушения связаны с уменьшением прочности и увеличением пластичности горных пород с температурой, но отмеченные закономерности также зависят от структурных факторов, в частности, от размера зерен породы.

ЛИТЕРАТУРА

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

Машинский Э.И. Процессы квазимикропластичности и нелинейная сейсмика // *Физика Земли*, 1994, № 2, с. 3—10.

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. 3, с. 410—413.

Amitrano D. Variability in the power-law distributions of rupture events // *Eur. Phys. J. Special Topics*, 2012, v. 205, p. 199—215.

Davidson J., Stanchits S., Dresen G. Scaling and universality in rock fracture // *Phys. Rev. Lett.*, 2007, v. 98, p. 125502 (1—4).

Johnson B., Handin J. Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes // 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics, May 1—3, 1978. Reno, Nevada, 1978, p.

Keshavarz M., Pellet F.L., Loret B. Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to 1,000 °C // *Pure Appl. Geophys.*, 2010, v. 167, p. 1511—1523.

Kuksenko V., Tomilin N., Chmel A. The role of driving rate in scaling characteristics of rock fracture // *J. Stat. Mech.*, 2005, p. P06012 (1—13).

Kuksenko V., Tomilin N., Chmel A. The rock fracture experiment with a drive control: a spatial aspect // *Tectonophys.*, 2007, v. 431, p. 123—129.

Kusunose K., Lei X., Nishizawa O., Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock // *Phys. Earth Plan. Interiors*, 1991, v. 67, № 1—2, p. 194—199.

Lei X., Satoh T. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage // *Tectonophys.*, 2007, v. 431, p. 97—111.

Liang Z.Y., Chen Z.Q., Ni X.Y. Experimental analysis on acoustic emission of the fracture marble under high temperature // *Adv. Mater. Res.*, 2011, v. 197—198, p. 1430—1434.

Mashinskii E.I. Microplasticity effects in low-velocity zone induced by seismic wave // *J. Appl. Geoph.*, 2012, v. 83, p. 90—95.

Mori J., Abercrombie R.E. Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: implications for rupture initiation // *J. Geophys. Res. B.*, 1997, v. 102, p. 15081—15090.

Rabinovitch A., Bahat D., Frid V. Gutenberg-Richter type relation for laboratory fracture induced electromagnetic radiation // *Phys. Rev. E*, 2002, v. 65, p. 011401—011404.

Scholz C.H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // *Bull. Seismic. Soc. Amer.*, 1968, v. 73, p. 1417—1432.

Telesca L., Lovallo M. Investigating non-uniform scaling behavior in temporal fluctuations of seismicity // *Nat. Hazards Earth System Sci.*, 2008, v. 8, p. 971—976.

Wang D.-y., Wu G., Ge X.-r. Acoustic emission characteristics of limestone during compression and fracture after high temperature // *J. Shanghai Jiaotong Univer.*, 2011, v. 45, p. 743—748.

Yong C., Wang C.-y. Thermally induced acoustic emission in Westerly granite // *Geophys. Res. Lett.*, 1980, v. 7, p. 1089—1092.

Zavyalov A.D., Sobolev G.A. Analogy in precursors of dynamic events at different scales // *Tectonophys.*, 1988, v. 152, p. 277—282.