

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА

© 2020 г. В. Т. Беликов¹, *, И. А. Козлова¹, Д. Г. Рывкин¹, А. К. Юрков¹

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*E-mail: belik2a@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2017 г.

После доработки 27.03.2019 г.

Принята к публикации 07.10.2019 г.

Проведены лабораторные эксперименты по наблюдениям сигналов акустической эмиссии и временных вариаций объемной активности радона в процессе одноосного нагружения образца гранита вплоть до его разрушения. По результатам экспериментов построены амплитудно-частотные спектры акустической эмиссии для четырех последовательных моментов времени. Количественная интерпретация полученных данных позволила исследовать временные изменения структурных параметров горной породы, характер развития процесса разрушения, а также закономерности сменяемости его отдельных этапов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, амплитудно-частотные спектры.

DOI: 10.31857/S0002333720030023

ВВЕДЕНИЕ

При изучении разрушения как разворачивающегося во времени физического процесса необходимо иметь информацию об изменении структурных характеристик горных пород. Такие сведения могут быть получены в результате количественной интерпретации экспериментальных данных по индикаторам процессов разрушения, в качестве которых обычно используются акустическая эмиссия (АЭ) [Грешников, 1976; Баранов, 1990], а также временные вариации объемной активности радона (ОАР) [Гидро-геохимические..., 1985; Булашевич, 1996]. Методы, связанные с анализом сигналов АЭ, в настоящее время широко применяются при решении задач контроля, диагностики и прогнозирования разрушения материалов. Чаще всего АЭ возникает при внешнем воздействии на твердые тела гетерогенного строения. Обнаружено появление сигналов АЭ в горных породах [Рыкунов, 1979]. Подробное изучение АЭ, возникающей при деформировании и разрушении крупных образцов горных пород было проведено в работе [Соболев, 2003]. Одной из важнейших проблем при изучении АЭ, является количественная интерпретация результатов ее наблюдений. Основой для решения такой задачи должны стать уравнения, устанавливающие функциональные связи между параметрами сигналов

АЭ и структурными характеристиками материала. Такие соотношения, а также физико-математическая модель для описания процессов АЭ были рассмотрены в работе [Алейников, 1993]. Зависимость амплитудно-частотного (АЧ) спектра АЭ от структурных характеристик разрушающегося твердого тела была исследована в работе [Беликов, 2010]. В дальнейшем была разработана обобщенная количественная физическая модель для изучения АЭ, а также рассмотрены основные этапы процедуры восстановления структурных параметров материала по результатам ее наблюдений [Беликов, 2015]. Временные изменения структурных характеристик твердого тела по мере развития процессов разрушения можно исследовать, если провести количественную интерпретацию экспериментальных данных по АЧ спектрам АЭ, зарегистрированным в различные моменты времени. В работах [Niccolini, 2010; Schiavi, 2011] были проведены наблюдения АЭ при одноосном нагружении образца бетона, а также построено несколько ее АЧ спектров в процессе разрушения. По двум из них в работе [Беликов, 2016а], были восстановлены функция распределения (ФР) по характерным размерам составляющих трещиновато-пористого пространства (ТПП), а также соответствующие распределения пористости и удельной внутренней поверхности (УВП). Срав-

нительный анализ построенных распределений, позволил исследовать особенности временных изменений структурных характеристик образца. Так же как и АЭ, аномалии ОАР несут в себе информацию об изменении структурно-петрофизических характеристик горных пород в процессе разрушения. В работе [Беликов, 2011], была предложена количественная физическая модель для описания миграции радона в разрушающейся трещиновато-пористой среде. На основании этой модели был разработан алгоритм количественной интерпретации экспериментальных данных по вариациям ОАР с целью изучения временных изменений структурных характеристик горной породы. Для проверки разработанной модели и тестирования предложенного алгоритма в работах [Беликов, 2013; 2014] было проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов выделения радона при разрушении образцов горных пород. Совместная интерпретация экспериментальных данных по наблюдениям АЭ и временных вариаций ОАР позволит получить более полную информацию о характере изменения структурных параметров среды в процессе разрушения. Поэтому представляется целесообразным поставить лабораторные эксперименты по разрушению образцов горных пород с одновременной регистрацией сигналов АЭ и временных вариаций ОАР, а затем проанализировать полученные результаты. Таким образом, цель данной работы состояла в том, чтобы провести наблюдения сигналов АЭ и временных вариаций ОАР при одноосном нагружении образца гранита, после чего, с использованием разработанной методики количественной интерпретации экспериментальных данных, исследовать характер временных изменений структурных параметров горной породы, а также закономерности сменяемости режимов развития процесса ее разрушения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента была смонтирована лабораторная установка, состоящая из гидравлического пресса ZARZAD SPRETU NK18, радиометра радона AlphaGUARD, акустического двухканального регистратора РДА-4п, датчиков АЭ, насоса и герметичной камеры для образцов. В эксперименте использовался образец гранита цилиндрической формы с параллельными торцевыми плоскостями, имеющий длину 10 см, диаметр 6 см. Образец был изготовлен из среднезернистого биотитового гранита с содержанием основных минералов: плагиоклаза — 52%, кварца — 23%, микроклина — 14%, биотита — 6.4%, роговой обманки — 2.1%. С помощью гидравлического пресса образец подвергался одноосному сжатию. Прилагаемая нагрузка менялась дискретно. Схема ее изменения представлена на рис. 1. Сигналы

АЭ регистрировались датчиком, закрепленным на образце, в течение 1–2 ч после каждого увеличения нагрузки. Как показали предварительно проведенные тестовые эксперименты на аналогичных по составу образцах гранита, отобранных из того же керна, после этого промежутка времени сигналы АЭ практически отсутствовали. Учет внешних акустических помех осуществлялся датчиком, закрепленным на корпусе гидравлического пресса. Для регистрации АЭ использовалась аппаратура РДА-4п с заводскими датчиками Д13, разработанная в Институте геофизики УрО РАН. Чувствительность усилительного тракта была не хуже 0.5 микровольт. Полоса пропускания составляла 10–5000 Гц. Для наблюдения вариаций ОАР использовался радиометр радона AlphaGUARD. ОАР регистрировалась в непрерывном режиме, с применением циркуляционной схемы измерений. Для установления равновесия между радием и радоном, образец предварительно выдерживался в камере в течение 28 дней. Наблюдаемые изменения ОАР в процессе нагружения образца гранита представлены на рис. 1. Данные результатов регистрации АЭ были использованы для построения ее мгновенных АЧ спектров [Харкевич, 1962]. Выбранные четыре момента времени, для которых рассчитывались АЧ спектры АЭ, отмечены на рис. 1 стрелками.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Механизмы генерации сигналов АЭ тесно связаны с процессами разрушения материала. Если считать разрушающееся твердое тело гетерогенным, то для изучения развития в пространстве и времени процесса его разрушения можно использовать модель и следующие из нее уравнения, описывающие явления тепломассопереноса в многофазной гетерогенной среде [Беликов, 1991; Алейников, 1993]. При этом необходимо учитывать в общем балансе энергии также и поверхностную ее часть. Когда мы рассматриваем разрушающийся образец гранита, указанную выше модель необходимо конкретизировать. Как известно, горная порода представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из совокупности минеральных фаз. Поэтому, строго говоря, генерировать сигналы АЭ могут не только поверхности пор и трещин, но и разделяющие зерна горной породы межфазные границы, выведенные из равновесия. Однако при разрушении образца гранита, основным источником АЭ будут являться поверхности трещин, возникающих как в минеральных зернах, так и при межзерновом растрескивании горной породы. Принимая это во внимание, будем рассматривать материал образца гранита как двухфазную гетерогенную среду, состоящую из твердой фазы — “1”, которую считаем гомогенной, и газообразной (трещинной) фазы — “2”,

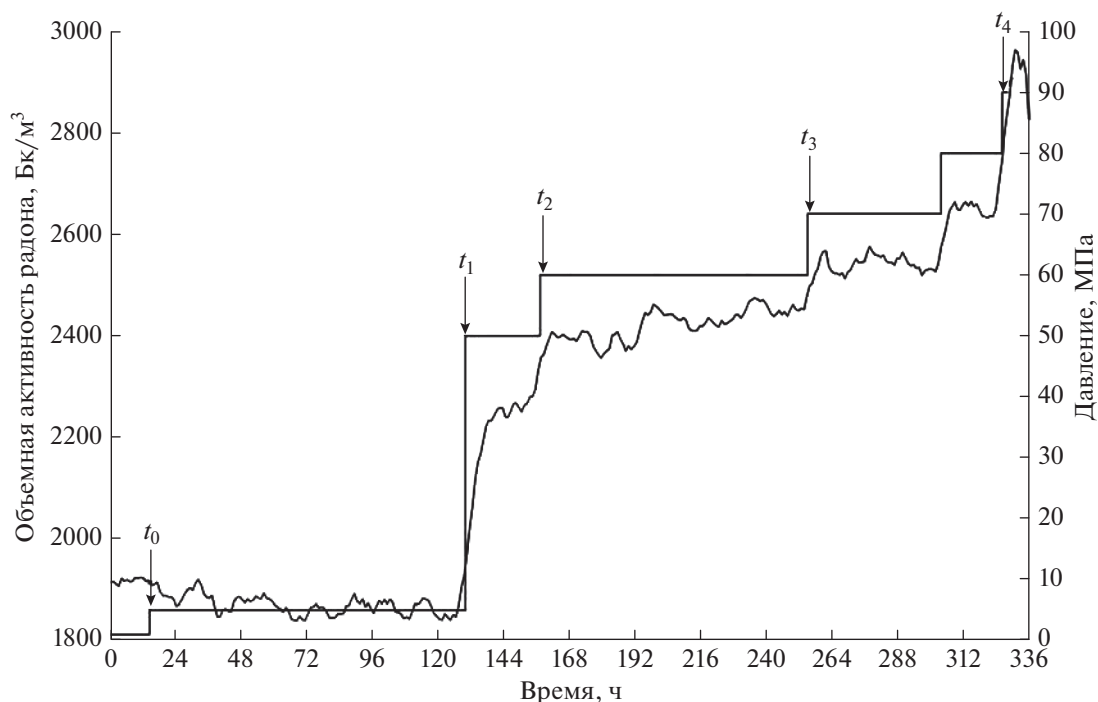


Рис. 1. Изменение ОАР и приложенной нагрузки (ломаная линия) при одноосном сжатии образца гранита. Стрелками отмечены моменты регистрации АЧ спектров АЭ t_1, t_2, t_3, t_4 , а также время t_0 , когда была приложена нагрузка 5 МПа.

представляющей собой пространство пор и трещин, в общем случае, заполненных газообразным флюидом. Уравнение баланса импульса единицы объема гетерогенной среды может быть получено суммированием соответствующих соотношений для каждой из фаз. Для двухфазного материала образца гранита в пренебрежении фазовыми переходами и диссипативными процессами, осредненное (по объему с характерными размерами много большими характерного размера фаз) уравнение баланса импульса будет иметь вид [Алейников, 1993; Беликов, 2016б]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_i v_k - \sigma_{ik}) - \Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)} \Omega_{12} = 0. \quad (1)$$

Здесь и далее индексы фаз, стоящие сверху, заключены в скобки. Буквами i, k обозначены тензорные индексы, пробегающие значения 1, 2, 3. Под повторяющимися индексами подразумевается суммирование. Обозначения в (1) следующие: $\rho = \rho_1 + \rho_2$ – плотность материала образца; ρ_1 и ρ_2 – осредненные плотности твердой и трещинной фазы соответственно; v_i – i -я компонента осредненной среднемассовой скорости среды, определяемой из соотношения $\rho v_i = \rho_1 v_i^{(1)} + \rho_2 v_i^{(2)}$, где: $v_i^{(1)}$ и $v_i^{(2)}$ – осредненные скорости твердой и трещинной фазы; $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)} \phi_1 + \sigma_{ik}^{(2)} \phi_2$ – тензор упругих напряжений в материале образца; $\sigma_{ik}^{(1)}$ и $\sigma_{ik}^{(2)}$ – осред-

ненные тензоры упругих напряжений в фазах; $\phi_1 = V_1/V$ и $\phi_2 = V_2/V$ – доли объема, приходящиеся на каждую из фаз; V_1 и V_2 – объемы, занимаемые фазами в пределах объема осреднения V , $V = V_1 + V_2$ [Алейников, 1993; Беликов, 1991; 2016б]. Для ϕ_1 и ϕ_2 справедливо соотношение $\phi_1 + \phi_2 = 1$.

Величина $\Delta \sigma_{ik}^{(12)} = \sigma_{ik}^{(1)} - \sigma_{ik}^{(2)}$ – разность осредненных по соответствующей фазе тензоров упругих напряжений; $\Omega_{12} = S_{12}/V$ – УВП; S_{12} – межфазная поверхность (граница) между твердой и трещинной фазами материала образца, которую будем считать гладкой; $\tilde{n}_k^{(1)} = 1/(V \Omega_{12}) \int_{S_{12}} n_k^{(1)} dS$ – осредненный

(по S_{12}) вектор нормали, внешней по отношению к твердой фазе, который, вообще говоря, не является единичным. В соответствии с природой газообразной фазы, осредненный тензор упругих напряжений в ней имеет вид $\sigma_{ik}^{(2)} = -p_2 \delta_{ik}$, где p_2 – осредненное давление газа в порах и трещинах; δ_{ik} – дельта-символ Кронекера. Имея это в виду, мы в дальнейшем, для сохранения общности, будем использовать обозначение $\sigma_{ik}^{(2)}$. Последнее слагаемое слева в (1) описывает величину импульса (рассчитанного на единицу объема), генерируемого в единицу времени ускоренно движущимися (колеблющимися) межфазными поверхностями, выведенными из равновесия процессами

разрушения. Из соотношения (1) может быть получено уравнение, характеризующее процесс распространения упругих волн в материале образца [Алейников, 1993; Беликов, 2016б]. Функция источника A_i в этом уравнении, описывающая процессы генерации АЭ, имеет вид [Беликов, 2015; 2016аб]

$$A_i = \frac{1}{\rho} \Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)} \Omega_{12} = v_{12}^2 L_i^{(12)}, \quad (2)$$

где v_{12} – частота АЭ, соответствующая колебаниям межфазной поверхности S_{12} между твердой и трещинной фазами материала образца, определяемая так [Беликов, 2010; 2015]:

$$v_{12} = \sqrt{\frac{\Delta \sigma_{12} \Omega_{12}}{\rho L^{(12)}}}. \quad (3)$$

Величина $\Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)} = \sigma_{ik}^{(1)} \tilde{n}_k^{(1)} - \sigma_{ik}^{(2)} \tilde{n}_k^{(1)}$ в (2) – это разность осредненных векторов упругих напряжений на границе между твердой и трещинной фазами. Она представляет собой силу, действующую на единицу площади межфазной поверхности S_{12} . Эту силу можно записать в виде $\Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)} = |\Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)}| e_i^{(12)}$, где $e_i^{(12)}$ – единичный вектор в направлении указанной силы, $\Delta \sigma_{12} = |\Delta \sigma_{ik}^{(12)} \tilde{n}_k^{(1)}| = |(\sigma_{ik}^{(1)} - \sigma_{ik}^{(2)}) \tilde{n}_k^{(1)}|$ – модуль осредненного вектора этой силы. Остальные обозначения в (2)–(3) следующие: $L_i^{(12)} = L^{(12)} e_i^{(12)}$, $L^{(12)}$ – осредненная (по S_{12}) амплитуда колебаний межфазной поверхности S_{12} . Параметр $\Delta \sigma_{12}$ называется осредненной разностью упругих напряжений на межфазной поверхности S_{12} [Беликов, 2015]. Если предполагать, что в процессе генерации АЭ поверхность S_{12} слабо отклоняется от положения равновесия, то ее изменение, а, следовательно, и изменение поверхностной энергии мало. В этом приближении работа разности упругих напряжений на границе фаз фактически полностью расходуется на акустическое излучение, а величина $\Delta \sigma_{12}$ практически совпадает с ее равновесным минимальным значением [Беликов, 2015]. С использованием (2)–(3) последнее слагаемое слева в (1) можно выразить через частоту v_{12} и амплитуду $L^{(12)}$. Тогда уравнение (1) примет следующий вид [Беликов, 2016б]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho v_i v_k - \sigma_{ik}) - v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} = 0. \quad (4)$$

Если пренебречь плотностью газообразной фазы по сравнению с плотностью твердого тела и считать ее покоящейся ($v_i^{(2)} = 0$), то $\rho = \rho_1$, а $v_i = v_i^{(1)}$. Пренебрегая давлением газа в порах и трещинах, получим, что $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)} \phi_1$. Так как обычно доля

объема, занимаемая трещинной фазой (пористость) $\phi_2 \ll 1$, то $\phi_1 \approx 1$, и тогда $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}$.

Уравнение баланса энергии единицы объема гетерогенной среды может быть получено суммированием соответствующих соотношений для каждой из фаз. Без учета фазовых переходов и диссипативных процессов, в предположении теплового равновесия между фазами, с использованием выражения (3) для частоты v_{12} , осредненное уравнение баланса объемной части энергии образца гранита, можно записать в виде [Беликов, 2016б]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \varepsilon - \sigma_{ik} v_k + J_i) - v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} v_i^{(1)} = 0, \quad (5)$$

где: ε – рассчитанная на единицу массы осредненная внутренняя и кинетическая энергия материала образца, определяемая так: $\rho \varepsilon = \rho_1 \varepsilon_1 + \rho_2 \varepsilon_2$, ε_1 и ε_2 – соответствующие энергии фаз; $J_i = J_i^{(1)} + J_i^{(2)}$ – кондуктивный поток тепла в образце, являющийся суммой соответствующих потоков в фазах. Последнее слагаемое слева в (5) представляет собой энергию (рассчитанную на единицу объема), излучаемую в единицу времени колеблющимися межфазными поверхностями, выведенными из равновесия процессами разрушения материала. Чтобы получить уравнение для полной энергии единицы объема образца гранита, к соотношению (5) необходимо прибавить уравнение для его поверхностной энергии, которое имеет вид [Беликов, 2008]:

$$\frac{dE_\Omega}{dt} = \gamma_{12} \mu_{12} \Omega_{12}, \quad (6)$$

где: E_Ω – поверхностная энергия единицы объема образца; μ_{12} – коэффициент поверхностного натяжения на межфазной поверхности S_{12} , который мы считаем постоянным; γ_{12} – структурный параметр, характеризующий скорость относительного изменения УВП Ω_{12} при движении межфазных границ [Беликов, 2008]. Отметим, что коэффициент поверхностного натяжения μ_{12} представляет собой свободную поверхностную энергию, рассчитанную на единицу площади [Беликов, 2008]. Суммируя (5) и (6), а также считая скорости деформации малыми, уравнение баланса полной (объемной и поверхностной) энергии разрушающегося образца гранита можно записать следующим образом [Беликов, 2016б]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon + E_\Omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i \varepsilon - \sigma_{ik} v_k + J_i) - v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} v_i^{(1)} - \gamma_{12} \mu_{12} \Omega_{12} = 0. \quad (7)$$

Если пренебречь кондуктивной теплопроводностью и энергией газообразной фазы по сравнению с соответствующими величинами для твердой фазы, то в уравнении (7) $J_i = J_i^{(1)}$, $\varepsilon = \varepsilon_1$, а кроме того, как и в (4) $\rho = \rho_1$, $v_i = v_i^{(1)}$, $\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{(1)}$.

В квазистационарном случае, в пренебрежении квадратичными по скоростям членами, уравнение баланса импульса (4) будет иметь вид:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} = 0, \quad (8)$$

а выражение для баланса полной энергии (7), если пренебречь ее конвективным потоком и кондуктивной теплопроводностью гранита, можно переписать так [Беликов, 2016б]:

$$v_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_i} + \sigma_{ik} \frac{\partial v_k}{\partial x_i} + C_{AE} + C_{\Omega} = 0, \quad (9)$$

где: $C_{AE} = v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} v_i^{(1)}$ – энергия, излученная в единицу времени единичным объемом разрушающегося образца гранита, которую мы будем называть далее мощностью АЭ; $C_{\Omega} = \gamma_{12} \mu_{12} \Omega_{12}$ – скорость изменения поверхностной энергии единицы объема материала образца. Так как $v_i = v_i^{(1)}$, то в соответствии с (8), учитывая симметрию тензора упругих напряжений σ_{ik} , можем написать:

$$\begin{aligned} v_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_i} &= v_i \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = v_i^{(1)} \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \\ &= -v_{12}^2 \rho L^{(12)} e_i^{(12)} v_i^{(1)} = -C_{AE}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) получаем равенство

$$v_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_i} + C_{AE} = 0. \quad (11)$$

Можно показать, что $v_k \partial \sigma_{ik} / \partial x_i$ (первое слагаемое слева в (9) и (11)) входит в соотношение для баланса кинетической энергии твердого тела. Отсюда следует, что эта величина описывает работу, совершаемую в единицу времени упругими силами, идущую на увеличение кинетической энергии единицы объема разрушающегося образца гранита. Рост кинетической энергии обусловлен, в свою очередь, распространяющимися в среде упругими волнами, возбуждаемыми колебаниями межфазной поверхности S_{12} , инициированными процессами образования и роста трещин. Подставляя (11) в (9) и учитывая симметрию тензора упругих напряжений, получим, что:

$$\sigma_{ik} v_{ik} + C_{\Omega} = 0, \quad (12)$$

где $v_{ik} = 1/2(\partial v_i / \partial x_k + \partial v_k / \partial x_i)$ – осредненный тензор скоростей деформации [Беликов, 2008]. Из полученного равенства следует, что второе слагаемое слева в (9), совпадающее с $\sigma_{ik} v_{ik}$ в (12), описывает мощность упругих сил, расходуемую

на изменение поверхностной энергии материала. Таким образом, в рамках принятых нами приближений справедливо не только условие (9), но и выполняются равенства (11) и (12) по отдельности. В зависимости от соотношения между первым и вторым слагаемыми слева в (9), режим развития процессов разрушения может быть различным [Беликов, 2016б]. При выполнении условия (9), энергия внешнего воздействия расходуется как на акустическое излучение, так и на изменение поверхностной энергии разрушающегося образца гранита. Если первое слагаемое слева в (9) много больше второго, то процесс разрушения описывается соотношением (11). В этом случае мощность упругих сил практически полностью расходуется на генерацию сигналов АЭ межфазной поверхностью S_{12} . Если первое слагаемое слева в (9) много меньше второго, справедливо соотношение (12) и разрушение происходит таким образом, что мощность упругих сил тратится только на изменение поверхностной энергии материала. Выражение (12) можно рассматривать как пространственный аналог энергетического критерия Гриффитса [Griffith, 1920], записанного для ГПП, структурной характеристикой которого является УВП Ω_{12} . Характер развития процессов разрушения, соответствующий (12) можно условно назвать эволюционным (не сопровождающимся дискретной АЭ) [Беликов, 2008]. В силу уравнений (11) и (12), рассмотренные выше режимы развития процессов разрушения образца гранита можно охарактеризовать и в зависимости от соотношения между величинами C_{AE} и C_{Ω} . Если C_{AE} и C_{Ω} одного порядка, развитие процессов разрушения будет описываться соотношением (9). Когда $C_{AE} \gg C_{\Omega}$, характер развития процессов разрушения будет определяться условием (11). На данном этапе в образце будут происходить процессы образования трещин, а также их слияния и укрупнения, сопровождающиеся АЭ. Если $C_{\Omega} \gg C_{AE}$, режим развития процессов разрушения будет описываться уравнением (12). На этом эволюционном этапе развития процессов разрушения АЭ будут незначительными, а вся мощность упругих сил будет расходоваться на деформацию твердого тела, в том числе и на деформацию межфазной поверхности S_{12} . Это, в свою очередь, будет приводить к изменению УВП и, как следствие, поверхностной энергии. Таким образом, информация о значениях величин C_{AE} и C_{Ω} дает возможность не только охарактеризовать режим развития процесса разрушения, но и позволяет осуществить прогноз наступления того или иного его этапа. В настоящей работе использованы данные о C_{AE} и C_{Ω} , полученные в результате количественной интерпретации экспериментального материала по наблюдениям АЭ. Фи-

зико-математическая модель, на которой основана процедура интерпретации, подробно рассмотрена в работах [Беликов, 2015; 2016а]. Чтобы детально исследовать процессы генерации АЭ и учесть вклад в ее спектр отдельных составляющих ТПП, можно ввести для них соответствующую ФР. Причем в качестве основной величины, описывающей структуру ТПП, целесообразно выбрать характерный размер этих составляющих и ограничиться рассмотрением ФР лишь только по этому параметру, считая, что ТПП представляет собой совокупность (ансамбль) излучающих сферических полостей, радиусы которых изменяются в некотором интервале, с границами, определяемыми структурой среды. Тогда радиус каждой сферической полости r можно трактовать как характерный (эффективный) размер соответствующей составляющей ТПП. Выбор параметров ансамбля сферических полостей должен быть осуществлен таким образом, чтобы их общая поверхность, а также общий объем, сколь угодно мало отличались от значений аналогичных характеристик единицы объема образца гранита. Будем предполагать также, что энергия, излучаемая данным ансамблем сферических полостей в единицу времени, практически совпадает с мощностью акустического излучения, генерируемого средой. Каждую из полостей можно рассматривать как монополь, имеющий хоть и малые (по сравнению с длиной излучаемой им волны), но конечные размеры [Исакович, 1973]. Таким образом, звуковое поле, возбуждаемое межфазной поверхностью S_{12} , находящейся в единичном объеме образца, мы заменяем суперпозицией полей акустически эквивалентного ТПП ансамбля монополей, параметры которого должны удовлетворять изложенным выше условиям [Беликов, 2015; 2016а]. Возможность представления акустического поля, возбуждаемого поверхностью S_{12} , в виде суперпозиции полей ансамбля монополей, обусловлена следующими причинами. Как правило, сигналы АЭ регистрируются в волновой зоне, на расстояниях, много больших характерных размеров трещин (включений). Поэтому, если размеры трещин малы по сравнению с длиной излучаемой ими волны, то на расстояниях, где принимаются сигналы АЭ, главная часть возбуждаемого трещинами поля практически совпадает с расходящейся сферически симметричной волной, создаваемой пульсирующей сферой малого радиуса (монополь) с объемной производительностью, равной скорости изменения объема включения [Исакович, 1973]. Для описания ансамбля монополей будем использовать нормированную ФР сферических полостей по размерам (радиусам) $f(r)$, которую определим как относительное их количество в единице объема, приходящееся на единичный интервал изменения радиусов [Беликов, 2015]. Сфе-

рические полости с радиусами от r до $r + \Delta r$ будут соответствовать составляющим ТПП, эффективный размер которых изменяется в этих же пределах. Для этого набора сферических полостей, рассматриваемых как отдельная фаза (в рамках всего ТПП) можно, согласно (3), ввести характерную частоту. Помимо функции $f(r)$ будем использовать ФР $\tilde{f}(r)$, которую назовем ненормированной, связанную с $f(r)$ соотношением $\tilde{f}(r) = Nf(r)$, где N – общее количество излучающих сферических полостей в единице объема с радиусами от R_{\min} до R_{\max} (минимальный и максимальный размеры соответственно). Структурные характеристики материала, такие как пористость φ_2 и УВП Ω_{12} , могут быть выражены через ФР $\tilde{f}(r)$, следующим образом [Беликов, 2010; 2015]:

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{3} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}(r) dr; \quad \Omega_{12} = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}(r) dr. \quad (13)$$

Рассмотрим вопрос о вычислении мощности АЭ C_{AE} , генерируемой ансамблем монополей. Когда мы рассматриваем гармонические сферически-симметричные колебания полости, направления вектора скорости и вектора силы, действующей на ее поверхности, совпадают. Тогда на поверхности полости радиуса r $v_i^{(1)} = v_i^{(2)} = w_r e_i^r$, где: w_r – модуль скорости ее колебаний; e_i^r – единичный вектор в направлении силы, действующей на единицу площади поверхности полости (аналог $e_i^{(12)}$). При этом для гармонических колебаний, $w_r = v_r L_r$, где v_r и L_r – соответствующие полости радиуса r частота и амплитуда колебаний ее поверхности. Выражение для C_{AE}^r – мощности АЭ, излучаемой монополями с радиусами в интервале от r до $r + \Delta r$, может быть получено из общего соотношения, определяющего C_{AE} , если учесть, что в данном случае $v_{12} = v_r$, $L^{(12)} = L_r$, $e_i^{(12)} = e_i^r$, тогда [Беликов, 2016б]:

$$C_{AE}^r = v_r^2 \rho L_r e_i^r w_r e_i^r = v_r^2 \rho L_r w_r = v_r^3 \rho L_r^2. \quad (14)$$

Полная энергия, генерируемая ансамблем сферических полостей, получается суммированием соотношений (14) по всем интервалам размеров излучателей:

$$C_{AE} = \sum_r C_{AE}^r = \sum_r v_r^3 \rho L_r^2. \quad (15)$$

РАСЧЕТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процедуру решения обратной задачи о восстановлении структурных характеристик материала по АЧ спектру АЭ можно разделить на три основ-

ных этапа [Беликов, 2010; 2015]. На *первом* должна быть проведена идентификация источников АЭ и установлена их физическая природа. На *втором* этапе следует определить интервал изменения характерных размеров составляющих ТПП, которые в процессе излучения формируют наблюдаемый спектр АЭ. На *третьем* этапе необходимо задать распределение осредненной разности упругих напряжений на поверхности полости $\Delta\sigma_{12}(r)$. Говоря о первом этапе, мы будем предполагать, что источником АЭ является колеблющаяся поверхность S_{12} , выведенная из равновесия процессами разрушения. По поводу второго этапа отметим следующее. Интервал, в котором изменяются радиусы акустически эквивалентного ТПП ансамбля монополей, определяется, в том числе и областью частот наблюдаемой АЭ. В данной работе регистрировались сигналы АЭ в интервале от 10 Гц до 5 кГц. Установить непосредственно соответствующий этой области частот интервал характерных размеров ТПП не удастся. Однако существуют данные, согласно которым минимальные регистрируемые амплитуды АЭ соответствуют размеру трещин порядка 80 мкм [Poponagiev, 1997]. С другой стороны, в работе [Moog, 1995] показано, что в окрестности будущего разрыва преобладают трещины, характерный размер которых составляет 100–200 мкм. При образовании макроразрыва размеры трещин увеличиваются, по крайней мере, на порядок [Reches, 1994]. В силу того, что мы исследуем процесс разрушения образца гранита от начала нагружения до разделения его на части, интервал изменения размеров ансамбля монополей был взят от 1 до 1000 мкм. Следует отметить, что при изучении процессов разрушения с использованием нескольких, зафиксированных в последовательные моменты времени АЧ спектров АЭ, сама по себе величина интервала изменения радиусов ансамбля монополей не является определяющим параметром. В данном случае гораздо важнее провести сравнительный анализ динамики перераспределения составляющих ТПП по их характерным размерам в процессе разрушения. Рассматривая третий этап, допустим, как было сказано выше, что межфазная поверхность S_{12} слабо отклоняется от ее равновесного положения, в этом случае незначительно будет меняться и ее кривизна. Для полостей, совершающих малые сферически-симметричные колебания, это допущение эквивалентно предположению о том, что в процессе излучения слабо меняется их радиус. В этом случае $\Delta\sigma_{12}(r)$ можно принять равным его минимальному значению, для которого (считая твердую фазу изотропной), в соответствии с формулой Лапласа, можно записать выражение:

$$\Delta\sigma_{12}(r) = K/r, \quad (16)$$

где: $K = 2\mu_{12}$; μ_{12} – коэффициент поверхностного натяжения [Ландау, 1964; 1986]. Мы использовали зависимость (16), учитывая, что K , особенно для полостей малых радиусов, является, фактически, удельной (рассчитанной на единицу площади поверхности) работой пластической деформации [Беликов, 2015]. В расчетах величина K рассматривалась как коэффициент пропорциональности и вычислялась в процессе интерпретации. Шкала размеров излучающих сферических полостей, а также шкала частот в АЧ спектре АЭ разбивались на промежутки. При этом считалось, что эти шкалы разнонаправленные [Беликов, 2015], поэтому минимальному размеру R_{\min} соответствует максимальная частота в АЧ спектре, а максимальному R_{\max} – минимальная. Для установления соответствия между промежуточными значениями v_{12} и r была использована линейная зависимость. Методика расчета поинтервальных значений ненормированной ФР, УВП и пористости, с использованием соотношений (3), (13), (16), подробно рассмотрена в работе [Беликов, 2015]. В первом приближении коэффициент K считался постоянным во всем промежутке изменения радиусов ансамбля монополей и определялся по данным поинтервальных значений размеров полостей, а также частот и амплитуд в АЧ спектре АЭ. При проведении расчетов во втором приближении предполагалось, что коэффициент K может принимать различные значения в каждом из интервалов разбиения шкалы радиусов. Для определения его поинтервальных значений была использована процедура, сводящаяся к поиску экстремума функционала, характеризующего полную (в том числе и поверхностную) свободную энергию среды [Беликов, 2015]. Если предполагать, что процесс генерации сигналов АЭ происходит в условиях, когда среда находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию, ее свободная энергия должна иметь минимум [Ландау, 1964]. При постоянных объеме и температуре данное условие эквивалентно требованию минимума поверхностной свободной энергии $F_{12} = \mu_{12}\Omega_{12}$ [Беликов, 2008; 2015]. А это, при постоянстве μ_{12} , в свою очередь, означает, что к минимуму стремится УВП Ω_{12} при неизменном объеме фаз. Последнее условие подразумевает постоянство пористости ϕ_2 . Таким образом, во втором приближении в каждом интервале шкалы размеров происходило варьирование коэффициента пропорциональности K , принятого в первом приближении, и рассчитывались соответствующие значения ФР, УВП и пористости. Далее, вычислялись общая УВП Ω_{12} и пористость ϕ_2 образца. В качестве истинного, выбирался вариант, при котором Ω_{12} была минимальной, а пористость отличалась от принятого нами ее зна-

чения $\phi_2 = 0.04$ не более чем на 10%. Предложенная выше методика количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ была применена для каждого из четырех АЧ спектров АЭ, зафиксированных через промежутки времени $t_1 = 115$ ч 17.32 мин, $t_2 = 142$ ч 24.52 мин, $t_3 = 240$ ч 01 мин, $t_4 = 311$ ч 03.4 мин, отсчитываемые от момента повышения нагрузки до 5 МПа (обозначен t_0 на рис. 1). Времена регистрации спектров указаны на рис. 1. Чтобы среда успела почувствовать изменение нагрузки, моменты времени, для которых рассчитывались АЧ спектры АЭ, выбирались через несколько минут после ее повышения. На рис. 2 представлены соответствующие каждому из АЧ спектров нормированные ФР второго приближения, а на рис. 3 распределения относительных (по отношению к Ω_{12}) значений излучающей УВП. Сравнение построенных на моменты времени t_1 и t_2 графиков ФР приводит к следующим результатам. Если при $t = t_1$ в материале образца присутствуют трещины (составляющие ТПП) с характерными размерами 181, 340, 389, 505 и 575 мкм, при которых наблюдаются локальные максимумы ФР, то в момент времени t_2 , составляющие ТПП с размерами 181, 340, 505 и 575 мкм исчезают и появляются соответствующие локальному максимуму ФР трещины размера 144 мкм. При этом, максимум ФР в момент времени t_1 , отвечающий характерному размеру 389 мкм, при $t = t_2$ смещается к 386 мкм, практически сохраняя такую же амплитуду. Таким образом, к моменту времени t_2 перестают излучать трещины с характерными размерами 181, 340, 505 и 575 мкм и продолжается излучение составляющими ТПП в окрестности максимума ФР при 386 мкм. Кроме того, в момент времени t_2 начинают генерировать сигналы АЭ трещины размером 144 мкм. С другой стороны, сравнительный анализ распределений относительных значений УВП при $t = t_1$ и $t = t_2$, представленных на рис. 3, показывает следующее. Если в момент времени t_1 в основном излучают участки межфазной поверхности, соответствующие составляющим ТПП с характерными размерами 340, 389, 505 и 575 мкм, то при $t = t_2$ главный вклад в акустическое излучение дают фрагменты УВП вблизи характерного размера 386 мкм, и, в меньшей степени, размеров 461 и 564 мкм. Отметим что наличие максимума ФР при 181 мкм в момент времени t_1 , а также максимума при 144 мкм в момент времени t_2 практически не отражается на морфологии соответствующих распределений УВП в силу относительно малого вклада трещин небольших размеров в Ω_{12} [Беликов, 2015]. Таким образом, сравнительный анализ морфологии ФР, а также распределений относительных значений УВП показывает, что по

мере разрушения образца за период времени $t_2 - t_1$ перестают излучать трещины с относительно большими характерными размерами (505 и 575 мкм), а основной вклад в процесс генерации сигналов АЭ к моменту времени t_2 начинают давать трещины с размерами порядка 386 мкм. Этот вывод подтверждается и характером распределений по размерам относительных C_{AE}^r/C_{AE} значений мощности АЭ, рассчитанных в соответствии с формулами (14)–(15). Анализ приведенных на рис. 4 графиков C_{AE}^r/C_{AE} показывает, что если в момент времени t_1 основная часть энергии излучается составляющими ТПП в окрестности характерного размера 505 мкм и, частично, размеров 340, 389 и 575 мкм, то в момент времени t_2 подавляющую часть акустического излучения генерируют трещины с характерным размером 386 мкм. Таким образом, возникающие (а возможно уже существовавшие) на первоначальном этапе разрушения трещины, имеющие размер порядка 505 мкм и являющиеся основным источником АЭ при $t = t_1$, в момент времени t_2 перестают излучать. Объяснить это можно двумя причинами. Либо эти трещины к моменту времени t_2 перестают расти, и поэтому не излучают. Либо акустический импульс, генерируемый трещинами в окрестности размеров 144 и 386 мкм, соответствующих максимумам ФР при $t = t_2$, недостаточен для того, чтобы вывести из равновесия поверхности трещин размером 505 мкм. В пользу второго варианта объяснения отчасти говорит тот факт, что C_{AE} в момент времени t_2 падает по сравнению с ее значением при $t = t_1$ более чем на порядок. Анализ графиков ФР в моменты времени t_2 и t_3 показывает, что присутствующие при $t = t_2$ максимумы ФР, соответствующие составляющим ТПП с характерными размерами 144 и 386 мкм, в момент времени t_3 исчезают. Вместе с тем, к моменту времени t_3 в материале образца появляются соответствующие локальным максимумам ФР трещины с размерами 179, 351, 437 и 488 мкм. Сравнивая представленные на рис. 3 графики распределений относительных значений УВП на эти же моменты времени, также можно отметить, что при $t = t_3$ количество локальных максимумов увеличивается по сравнению с аналогичным распределением при $t = t_2$. В частности, в момент времени t_3 начинают излучать участки межфазной поверхности, соответствующие локальным максимумам в распределении УВП при 359, 437 и 488 мкм, которые ранее не излучали. Это означает, что в течение промежутка времени $t_3 - t_2$ процессы разрушения образца гранита распространяются на более широкий спектр характерных размеров трещин. Тот факт, что при $t = t_3$ в процесс генерации сигналов АЭ вовлекается большее количество отдельных

составляющих ТПП, подтверждается и сравнительным анализом распределений относительных значений мощности АЭ в моменты времени t_2 и t_3 , представленных на рис. 4. В самом деле, если в момент времени t_2 основная часть энергии излучается трещинами, вблизи характерного размера 386 мкм, то при $t = t_3$ большая часть АЭ генерируется составляющими ТПП в окрестности характерных размеров 351, 386, 437 и 488 мкм. В основном, появление этих составляющих связано с вновь возникающими в процессе разрушения трещинами в результате объединения более мелких микротрещин. Например, появление трещин, соответствующих на графике ФР в момент времени t_3 максимумам при 437 и 488 мкм и дающих в соответствии с морфологией распределений относительных значений УВП и мощности АЭ на эту же дату существенный вклад в акустическое излучение, могло быть обусловлено объединением и слиянием микротрещин меньших размеров. Анализируя графики ФР, а также соответствующих распределений относительных значений УВП и мощности АЭ на момент времени t_4 по сравнению с аналогичными графиками в момент времени t_3 , прежде всего отметим, что при $t > t_4$ происходит разрушение образца гранита. С этой точки зрения, данные при $t = t_4$ несут информацию о структуре образца перед его разрушением. Сравнительный анализ морфологии ФР на моменты времени t_3 и t_4 показывает следующее. Если в момент времени t_3 в процессе излучения участвуют составляющие ТПП из промежутка характерных размеров от 179 до 488 мкм, в котором наблюдается четыре максимума ФР, при 179, 351, 437 и 488 мкм, то в момент времени t_4 трещины компактно группируются в интервалах 119–160 и 303–354 мкм, а также в окрестности характерного размера 464 мкм. Сравнительный анализ распределений УВП при $t = t_3$ и $t = t_4$ также показывает, что уменьшается количество составляющих ТПП, участвующих в процессе излучения и происходит их группировка в более узких интервалах размеров. Действительно, если при $t = t_3$ сигналы АЭ генерируют участки межфазной поверхности из промежутка характерных размеров от 359 до 488 мкм, то в момент времени t_4 в основном излучают ее фрагменты, соответствующие составляющим ТПП в окрестности всего лишь двух характерных размеров 354 и 464 мкм. Вывод об уменьшении к моменту времени t_4 количества составляющих ТПП, участвующих в процессе излучения подтверждается и сравнительным анализом графиков распределений относительных значений мощности АЭ, построенных на моменты времени t_3 и t_4 . Из морфологии этих распределений, представленных на рис. 4, видно, что если в

момент времени t_3 АЭ обусловлена составляющими ТПП из интервала характерных размеров от 351 до 488 мкм, то при $t = t_4$ основная часть энергии излучается трещинами в окрестности размеров 354 и 464 мкм. Вариации ОАР генетически связаны с процессами разрушения и поэтому также несут в себе информацию об их развитии. Физическая модель, объясняющая механизм образования аномалий ОАР была предложена в работах [Беликов, 2011; 2013; 2014]. Согласно положениям кинетической теории прочности [Регель, 1974], в процессе разрушения сначала возникают микроскопические трещины, которые затем, в результате роста и слияния, образуют трещины макроскопических размеров. Вместе с тем, образуются области пронизываемого или открытого ТПП, так называемые открытые поры [Беликов, 2011], сообщающиеся с указанными макроскопическими трещинами. В этих областях в ТПП будет поступать радон из изолированных до разрушения отдельных пор и трещин, равновесная концентрация радиогенного газа в которых, может значительно превышать ее величину для открытых пор. В результате, в пронизываемом ТПП содержание радона возрастет по сравнению с тем его значением, которое было до начала процессов разрушения. При образовании и росте макроскопических трещин давление в них в течение некоторого промежутка времени будет меньше, чем в пронизываемом пространстве указанных областей. Поэтому, под действием возникшего градиента давления в направлении этих трещин будет происходить движение газообразного флюида вместе с содержащимся в нем радоном. В результате, его количество в макроскопических трещинах значительно возрастет. Таким образом, макроскопические трещины аккумулируют из горной породы выделившийся в результате процессов разрушения радон посредством его конвективного сбора по пронизываемым участкам ТПП. Если эти трещины сообщаются с измерительной камерой, происходит рост ОАР, наблюдающийся в эксперименте. Как видно из рис. 1, наиболее быстрое увеличение ОАР происходит в течение временных интервалов $t_2 - t_1$ и $t_4 - t_3$. Повышение концентрации радона в течение промежутка времени $t_2 - t_1$ обусловлено тем, что в процессе своего роста некоторые из макроскопических трещин могут выйти на поверхность образца, в результате чего аккумулярованный в них радон поступает в камеру регистрации. В самом деле, как видно из рис. 2, у ФР при $t = t_1$ присутствуют составляющие ТПП с характерными размерами 505 и 575 мкм. Рост трещин таких относительно больших размеров и может привести к образованию магистральных трещин, сообщающихся с измерительной камерой. Более того, некоторые из возникших магистральных трещин могут вызвать частичное разрушение

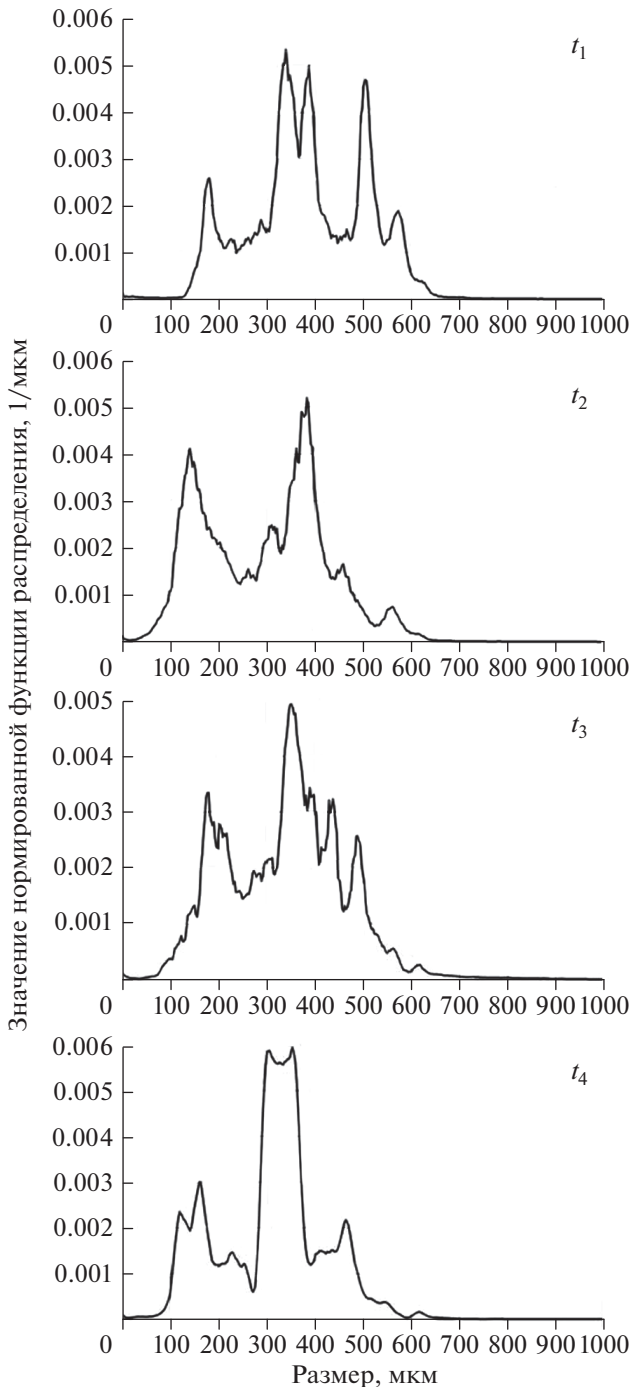


Рис. 2. Нормированные функции распределения $f(r)$ второго приближения в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 .

образца, сопровождающееся залповым выбросом радона. И в том, и в другом случае будет существенно увеличиваться ОАР. Такое явление действительно наблюдалось нами в течение промежутка времени $t_2 - t_1$, когда при повышении нагрузки от 5 до 50 МПа произошло отделение небольшого фрагмента от образца. Более медлен-

ный рост ОАР за время $t_3 - t_2$ объясняется, по-видимому, тем, что образование макроскопических трещин в этом временном интервале происходит менее интенсивно и, в основном, внутри объема образца без выхода их на его поверхность. Это может касаться, в частности, трещин с размерами 437 и 488 мкм, соответствующих максимумам ФР при $t = t_3$. Рост ОАР за время $t_4 - t_3$ в течение которого дважды повышалась нагрузка от 70 до 80 МПа и от 80 до 90 МПа, может быть обусловлен следующими причинами. Не смотря на то, что трещины с характерными размерами 505 и 575 мкм, как видно из графиков ФР при $t = t_3$ и $t = t_4$, практически не участвуют в генерации сигналов АЭ, они присутствуют в материале образца. По мере увеличения нагрузки в окрестности тех из них, которые сообщаются с измерительной камерой будут продолжаться процессы разрушения, сопровождающиеся ростом этих трещин в глубину образца. В результате чего, к ним будут подключаться новые, изолированные до разрушения поры и трещины вместе с содержащимся в них радонам. Это будет способствовать его поступлению в камеру регистрации и, как следствие, возрастанию ОАР в течение промежутка времени $t_4 - t_3$.

Важные выводы можно сделать на основе анализа характера изменения общей УВП образца гранита в процессе разрушения. Обозначим УВП материала в моменты времени t_1, t_2, t_3 и t_4 , соответственно, через $\Omega_{12}(t_1), \Omega_{12}(t_2), \Omega_{12}(t_3)$ и $\Omega_{12}(t_4)$. Результаты интерпретации данных по АЧ спектрам АЭ приводят к следующим соотношениям: $\Omega_{12}(t_2)/\Omega_{12}(t_1) = 1.14, \Omega_{12}(t_3)/\Omega_{12}(t_2) = 0.95, \Omega_{12}(t_4)/\Omega_{12}(t_3) = 1.1$, откуда следует, что $\Omega_{12}(t_2) = 1.14\Omega_{12}(t_1), \Omega_{12}(t_3) = 1.08\Omega_{12}(t_1), \Omega_{12}(t_4) = 1.19\Omega_{12}(t_1)$. Таким образом, в процессе разрушения наблюдается слабое немонотонное возрастание УВП образца к моменту времени t_4 по отношению к ее значению при $t = t_1$. Если учесть, что свободная поверхностная энергия единицы объема двухфазного гетерогенного материала $F_{12} = \mu_{12}\Omega_{12}$ [Беликов, 2008], то при постоянном μ_{12} , точно таким же образом будет изменяться и F_{12} в процессе разрушения. Выявленный характер изменения УВП говорит о том, что в течение временного интервала $t_4 - t_1$ преобладают процессы образования новых трещин, не очень значительно увеличивающие общую УВП Ω_{12} . Процессы слияния и укрупнения трещин, способствующие уменьшению УВП, проявляются слабо и, скорее всего, наступают при $t > t_4$, когда происходит образование магистральной трещины, приводящей к разрушению образца. Не исключено также, что уменьшение УВП вследствие процессов слияния и укрупнения трещин, которые, судя по характе-

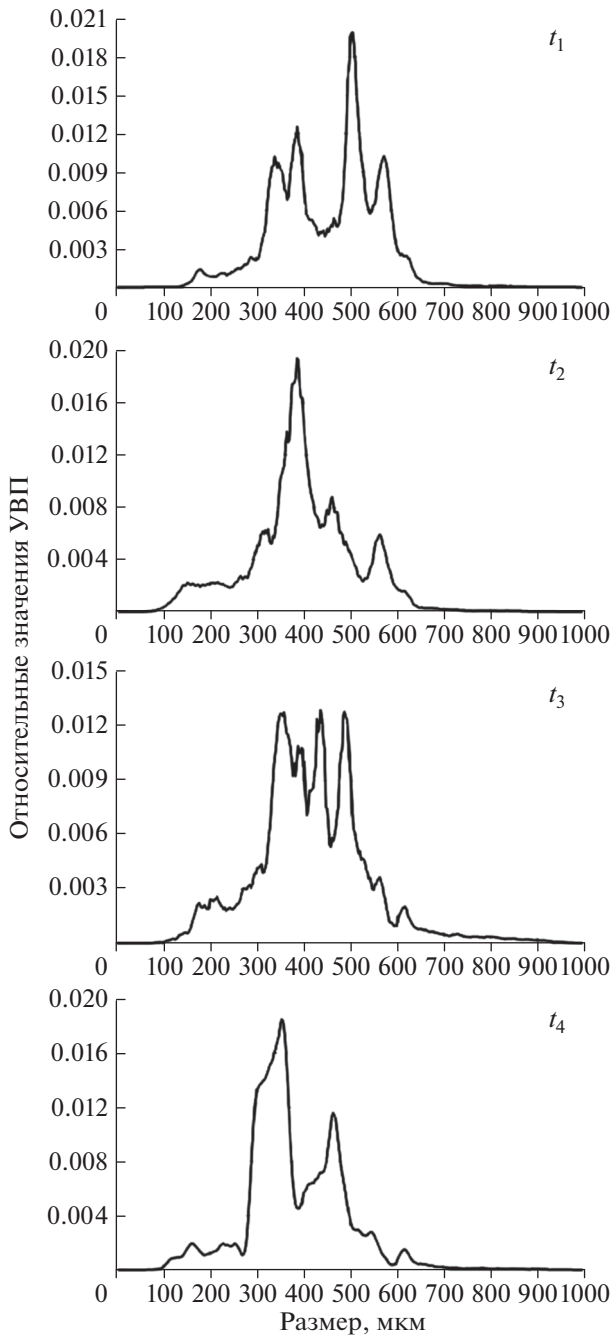


Рис. 3. Распределения относительных значений УВП в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 .

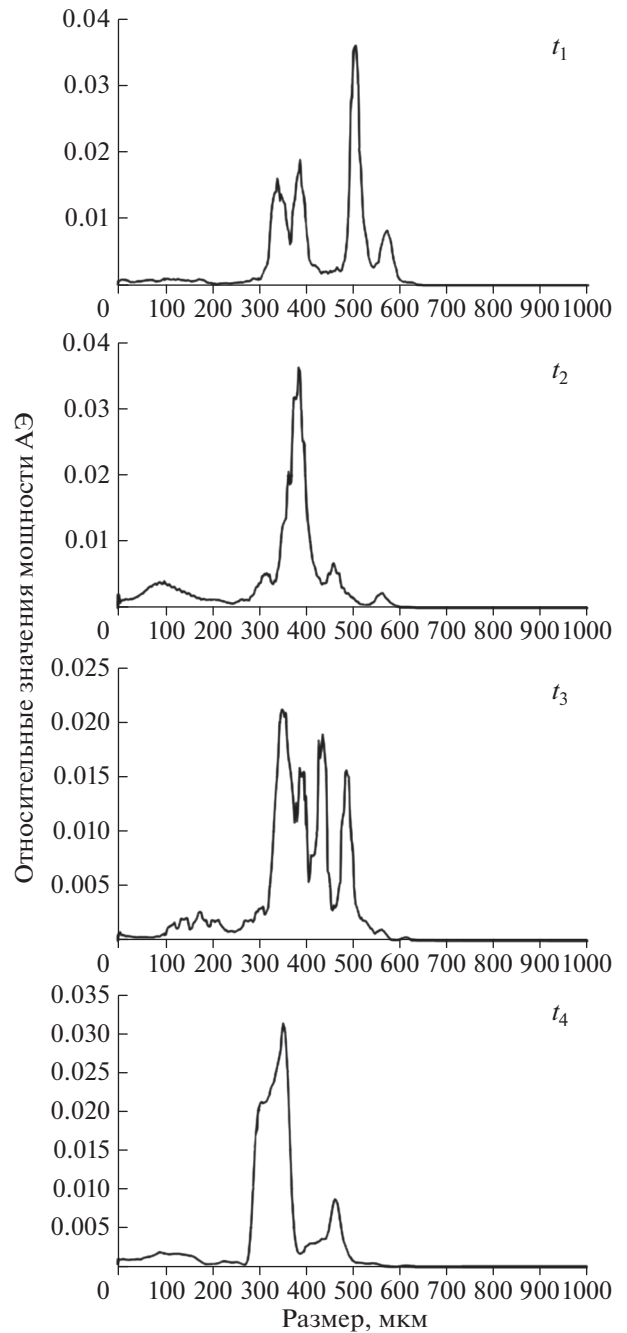


Рис. 4. Распределения относительных значений мощности АЭ в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 .

ру эволюции ФР (см. рис. 2), все же реализуются, практически полностью и даже с некоторым превышением компенсируются ее увеличением при образовании новых микротрещин. Такой характер изменения УВП и F_{12} связан, прежде всего, с растянутым во времени режимом развития процесса разрушения, обусловленным, в свою очередь, медленным возрастанием нагрузки на образец, когда каждое ее постоянное значение выдер-

живается в течение достаточно длительного промежутка времени (см. рис. 1).

Проанализируем закономерности изменения мощности АЭ C_{AE} в процессе разрушения образца. Обозначим генерируемую всеми составляющими ТПП мощность АЭ в моменты времени t_1, t_2, t_3 и t_4 через $C_{AE}(t_1), C_{AE}(t_2), C_{AE}(t_3)$ и $C_{AE}(t_4)$. Расчеты показывают, что $C_{AE}(t_2)/C_{AE}(t_1) = 0.094$,

$C_{AE}(t_3)/C_{AE}(t_2) = 0.038$, $C_{AE}(t_4)/C_{AE}(t_3) = 26.28$, откуда следуют соотношения $C_{AE}(t_2) = 0.094C_{AE}(t_1)$, $C_{AE}(t_3) = 0.004C_{AE}(t_1)$, $C_{AE}(t_4) = 0.094C_{AE}(t_1)$. Таким образом, в течение промежутка времени $t_4 - t_1$, значение $C_{AE}(t_3)$ является минимальным, а $C_{AE}(t_4)$ практически совпадает с $C_{AE}(t_2)$. Данные об изменении УВП Ω_{12} и мощности АЭ C_{AE} дают возможность исследовать характер развития процесса разрушения, а также проанализировать закономерности наступления какого-либо из его этапов. Для этого воспользуемся соотношениями (9), (11) и (12), а также выражениями для C_{Ω} и C_{AE} , приведенными выше. Прежде всего, отметим, что если предположить постоянство коэффициентов μ_{12} и γ_{12} , то отношения C_{Ω} в различные моменты времени совпадают с отношениями соответствующих значений Ω_{12} . Проследить эволюцию во времени уравнения энергетического баланса (7) в общем случае, не представляется возможным. Однако, учитывая медленный характер изменения нагрузки, будем предполагать, что процесс разрушения образца гранита представляет собой последовательность квазистационарных состояний, в каждом из которых выполняется соотношение (9). По мере развития процесса разрушения к моменту времени t_1 может реализоваться такой его этап, который характеризуется как общим уравнением (9), так и соотношениями (11) или (12), являющимися его частными случаями. Непосредственная информация о том, на каком этапе развития находятся процессы разрушения в момент времени t_1 , отсутствует. Однако известно, что t_1 – это время регистрации АЧ спектра АЭ, произошедшей через несколько минут после значительного увеличения нагрузки от 5 до 50 МПа. Будем считать, что при 5 МПа процессы разрушения в образце практически не происходят. Тогда можно предположить, что момент времени t_1 соответствует начальному этапу их развития, описываемому общим соотношением (9). Исследуем характер развития процесса разрушения в течение промежутка времени $t_2 - t_1$, привлекая для этого полученные нами выше данные о величине отношений $C_{AE}(t_2)/C_{AE}(t_1)$ и $C_{\Omega}(t_2)/C_{\Omega}(t_1)$. Итак, пусть в момент времени t_1 выполняется условие (9). Это означает, что все слагаемые в этом уравнении одного порядка и оба механизма перекачки энергии внешнего воздействия в акустическое излучение и изменение поверхностной энергии единицы объема образца гранита, сопоставимы. Тогда учитывая величину отношений $C_{\Omega}(t_2)/C_{\Omega}(t_1) = \Omega_{12}(t_2)/\Omega_{12}(t_1) = 1.14$ и $C_{AE}(t_2)/C_{AE}(t_1) = 0.094$, приходим к выводу, что скорость изменения поверхностной энергии единицы объема образца C_{Ω} практически не изменилась, а мощность АЭ C_{AE} упала более, чем на по-

рядок. Это означает, что режим развития процессов разрушения к моменту времени t_2 будет носить эволюционный характер, описываемый соотношением (12). В этом случае разрушение образца будет происходить таким образом, что практически вся мощность упругих сил будет расходоваться на изменение поверхностной энергии материала [Беликов, 2008]. Точно также из соотношений $C_{\Omega}(t_3)/C_{\Omega}(t_2) = \Omega_{12}(t_3)/\Omega_{12}(t_2) = 0.95$, $C_{AE}(t_3)/C_{AE}(t_2) = 0.038$ следует, что C_{Ω} за время $t_3 - t_2$ практически не меняется, а C_{AE} к моменту времени t_3 уменьшается по сравнению с ее значением при $t = t_2$ более, чем на порядок. Таким образом, в течение промежутка времени $t_3 - t_2$ процесс разрушения также будет проходить эволюционный этап, описываемый уравнением (12). Для моментов времени t_3 и t_4 аналогичные оценки отношений C_{Ω} и C_{AE} приводят к следующему результату $C_{\Omega}(t_4)/C_{\Omega}(t_3) = \Omega_{12}(t_4)/\Omega_{12}(t_3) = 1.1$ и $C_{AE}(t_4)/C_{AE}(t_3) = 26.28$. Отсюда следует, что C_{Ω} за время $t_4 - t_3$ практически постоянно, а C_{AE} в момент времени t_4 увеличивается по сравнению с ее значением при $t = t_3$ более, чем на порядок. Однако, не смотря на то, что в течение промежутка времени $t_4 - t_3$ произошло существенное (более чем в 26 раз) увеличение C_{AE} , его значение при $t = t_4$ $C_{AE}(t_4)$, как мы сказали выше, практически совпадает с $C_{AE}(t_2)$. В тоже время, имеем $C_{\Omega}(t_4)/C_{\Omega}(t_2) = \Omega_{12}(t_4)/\Omega_{12}(t_2) = 1.04$, откуда следует, что $C_{\Omega}(t_4)$ и $C_{\Omega}(t_2)$ приблизительно равны. Поэтому, если $C_{\Omega}(t_2)$ превосходит $C_{AE}(t_2)$ минимум на порядок, то и $C_{\Omega}(t_4)$ будет на порядок превосходить $C_{AE}(t_4)$. Это означает, что и в течение промежутка времени $t_4 - t_3$ режим развития процессов разрушения носит эволюционный характер, описываемый соотношением (12). Таким образом, на протяжении всего рассматриваемого временного интервала $t_4 - t_1$ процессы разрушения в образце гранита развиваются в эволюционном режиме, при котором энергия внешнего воздействия практически полностью расходуется на увеличение, хотя и не очень значительное, поверхностной энергии материала. Такой характер развития процессов разрушения, по сути, был ожидаем, и связан он, прежде всего, с выбранным режимом изменения нагрузки на образец. Результаты количественной интерпретации полученных экспериментальных данных проиллюстрировали этот факт и показали, что на протяжении всего промежутка времени $t_4 - t_1$ мощность упругих сил, расходуемая на АЭ, много меньше той ее части, которая тратится на изменение поверхностной энергии среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной методики количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ для четырех моментов времени были восстановлены ФР излучающих сферических полостей (монополей) по их радиусам, моделирующие распределение по характерным размерам отдельных составляющих ТПП, а также построены соответствующие распределения относительных значений УВП и мощности АЭ. Кроме того, были проанализированы особенности изменения ОАР в процессе разрушения образца. Сравнительное изучение морфологии ФР, а также распределений УВП и мощности АЭ, дало возможность исследовать динамику перераспределения составляющих ТПП по их характерным размерам по мере развития процессов разрушения. Анализ уравнения энергетического баланса с использованием полученных в результате интерпретации количественных данных показал, что на протяжении рассматриваемого промежутка времени $t_4 - t_1$ процессы разрушения развиваются в эволюционном режиме, при котором энергия внешнего воздействия на образец гранита практически полностью расходуется на увеличение (не очень существенное) поверхностной энергии материала. Затраты энергии на акустическое излучение при этом незначительны. Такой характер развития процесса разрушения образца связан, прежде всего, с выбранным режимом изменения нагрузки. С этой точки зрения представляется целесообразным провести подобного рода исследование при более высокой скорости увеличения нагрузки для получения информации об изменении структурных характеристик образца, а также характере развития процесса разрушения в этом случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И. Акустическая эмиссия в гетерогенных средах // Дефектоскопия. 1993. № 3. С. 31–36.
- Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат. 1990. 320 с.
- Беликов В.Т. Количественное описание процессов тепломассопереноса в литосфере // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 3–9.
- Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 461–470.
- Беликов В.Т. Восстановление структурных характеристик разрушающегося твердого тела по амплитудно-частотному спектру акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 56–63.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение изменений структурных и динамических характеристик разрушающегося массива горных пород с использованием вариаций концентрации радона // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 67–78.
- Беликов В.Т., Уткин В.И., Козлова И.А., Рывкин Д.Г., Юрков А.К. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов выделения радона при разрушении образцов горных пород // Докл. РАН. 2013. Т. 450. № 2. С. 222–223.
- Беликов В.Т., Козлова И.А., Рывкин Д.Г., Юрков А.К. Исследование процессов образования аномалий объемной активности радона при разрушении образцов горных пород // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 10. С. 1537–1542.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование результатов наблюдений акустической эмиссии для изучения структурных характеристик твердого тела // Акустический журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 622–630.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение изменений структурных характеристик твердого тела с использованием амплитудно-частотных спектров акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. 2016а. Т. 19. № 3. С. 103–109.
- Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Изучение характера развития процессов разрушения твердого тела с использованием результатов наблюдений акустической эмиссии // Уральский геофизический вестник. 2016б. № 1. С. 17–28.
- Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.В. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Докл. РАН. 1996. Т. 346. № 1. С. 245–248.
- Гидро-геохимические предвестники землетрясений. М.: Наука. 1985. 286 с.
- Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Издательство стандартов. 1976. 272 с.
- Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. 1973. 496 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 568 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.Н., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 569 с.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72–77.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Наука. 1962. 236 с.
- Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A. 1920. 221. P. 163–198.
- Moor D., Lockner D. The role of micro cracking in shear-fracture propagation in granite // J. Struct. Geol. 1995. V. 17. P. 95–114.
- Nicolini G., Schiavi A., Tarizzo P., Carpinteri A., Lacidogna G., Manuello A. Scaling in temporal occurrence of quasi-rigid body vibration pulses due to macro-fractures // Phys. Rev. E. 2010. V. 82. № 4. P. 046115 (1–5).
- Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A. Physical modelling of the formation and evolution of seismically active fault zones // Tectonophysics. V. 277. 1997. P. 57–81.
- Reches Z., Lockner D. Nucleation and growth of faults in brittle rocks // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 18159–18173.
- Schiavi A., Nicolini G., Tarizzo P., Carpinteri A., Lacidogna G., Manuello A. Acoustic emissions at high and low frequencies during compression tests in brittle materials // Strain. 2011. V. 47. № 2. P. 105–110.

The Character of Evolution of Rock Fracture Processes from the Observations of Acoustic Emission and Time Variations in Volumetric Activity of Radon

V. T. Belikov^{a, *}, I. A. Kozlova^a, D. G. Ryvkin^a, and A. K. Yurkov^a

^aBulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620016 Russia

**e-mail: belik2a@mail.ru*

Laboratory experiments on the observation of acoustic emission signals and time variations of the volumetric activity of radon during uniaxial loading of a granite sample up to its fracture have been carried out. Based on the results of the experiments, the amplitude-frequency spectra of acoustic emission have been constructed for four consecutive time instants. The quantitative interpretation of the data made it possible to study the time changes in the structural parameters of the rock, the pattern of the evolution of fracture process, and the regularities in the alternation of the individual stages of this process have been studied.

Keywords: acoustic emission, amplitude-frequency spectra