

УДК 539.3

Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии

И.А. Пантелеев¹, Ю.Ф. Коваленко², Ю.В. Сидорин², А.В. Зайцев³,
В.И. Карев², К.Б. Устинов², Н.И. Шевцов²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, 614013, Россия

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, Россия

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Россия

Проведено экспериментальное исследование процесса накопления повреждений при сложном (непропорциональном) неравнокомпонентном сжатии песчаника на испытательной системе трехосного независимого нагружения с *in situ* регистрацией дискретных импульсов акустической эмиссии на нагружающей плите и свободной от напряжения грани кубических образцов. Проведен сравнительный анализ данных акустической эмиссии, зарегистрированных на образцах и плите, который позволил установить качественное соответствие изменения интегрального (суммарный счет) и дифференциального (активность акустической эмиссии) параметров в процессе деформирования песчаника. По результатам проведенного частотного анализа волновых форм зарегистрированных импульсов акустической эмиссии установлено, что импульсы от датчиков, зафиксированных на нагружающей плите испытательной системы трехосного независимого нагружения, являются более низкочастотными по сравнению с импульсами датчиков, закрепленных непосредственно на образце. Выявленные отличия являются следствием различия акустических импедансов образцов и плиты, определяются дисперсией, рассеиванием и ослаблением сигнала в процессе его распространения в системе «повреждаемый образец – плита». Установлено, что формирование полос локализованной деформации, фрагментация и появление макродефекта сопровождаются активизацией акустической эмиссии и изменением ее частотного состава. Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность регистрации акустической эмиссии при закреплении датчика на одной из нагружающих плит испытательной системы трехосного независимого нагружения и возможность измерения акустической эмиссии при истинно трехосном неравнокомпонентном сжатии. Размещение датчика на плите позволило регистрировать сигналы акустической эмиссии на этапах локализации, фрагментации и роста макродефекта, когда наблюдается существенное нарушение сплошности образца. Это позволяет получать информацию о характере эволюции повреждений на стадии деформационного разупрочнения, проводить экспериментальные исследования процесса накопления повреждений при трехосном пропорциональном и непропорциональном деформировании горных пород.

Ключевые слова: двухосное непропорциональное нагружение, неравнокомпонентное сжатие, акустическая эмиссия, поврежденность, полосы локализованной деформации, макроразрушение

DOI 10.24411/1683-805X-2019-14006

Damage evolution under complex nonuniform compression of sandstone according to acoustic emission data

I.A. Panteleev¹, Yu.F. Kovalenko², Yu.V. Sidorin², A.V. Zaitsev³, V.I. Karev²,
K.B. Ustinov², and N.I. Shevtsov²

¹ Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, 614013, Russia

² Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

³ Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russia

Damage accumulation during complex (nonproportional) nonuniform compression of sandstone was studied experimentally on the triaxial independent loading test system with *in situ* recording of discrete acoustic emission pulses on the loading plate and stress-free faces of cubic samples. A comparative analysis of the acoustic emission data recorded for the samples and the plate was carried out to reveal a qualitative correspondence between the changes in the integral (total score) and differential (acoustic emission activity) parameters during sandstone deformation. Frequency analysis of the waveforms of the recorded acoustic emission pulses showed that the pulses from the sensors mounted on the loading plate of the test system have lower frequency compared to the pulses from the sensors mounted directly on the sample. The revealed differences result from differences in the acoustic impedances of the samples and the plate; they are determined by the dispersion, scattering, and attenuation of the signal when it propagates in the damaged sample – plate system. It was found that the formation of localized deformation bands, fragmentation, and macrodefect nucleation are accompanied by activation of acoustic emission and a change in its frequency composition. The performed experiments proved that it is possible to record acoustic emission when the sensor is mounted on one of the test system loading plates, and therefore possible to measure acoustic emission under triaxial nonuniform compression. With the sensor mounted on the plate, acoustic emission signals were recorded at the stages of localization, fragmentation, and macrodefect growth, when the sample continuity is significantly violated. This method provides information about damage evolution at the stage of strain softening, and allows one to study experimentally damage accumulation during triaxial proportional and nonproportional deformation of rocks.

Keywords: biaxial nonproportional loading, nonuniform compression, acoustic emission, damage, localized deformation bands, macrofracture

1. Введение

Метод акустической эмиссии является широко распространенным методом неразрушающего контроля, используемым при механических испытаниях структурно-неоднородных материалов различного типа [1–16]. Анализ данных акустической эмиссии позволяет исследовать статистические закономерности и определять характерные стадии накопления повреждений при деформировании материала, пространственную локализацию очагов акустической эмиссии [17–21], в отдельных случаях разделять механизмы разрушения, которые являются источниками акустической эмиссии [22–28].

Целью настоящей работы является исследование закономерностей акустической эмиссии при двухосном сложном неравнокомпонентном сжатии (одноосное предельно «жесткое» сжатие с частичным боковым подпором) образца песчаника и проведение сравнительного анализа данных акустической эмиссии, зарегистрированных на свободной поверхности образца и нагружающей плите.

В экспериментах использована испытательная система трехосного независимого нагружения для физического моделирования трехмерного напряженно-деформированного состояния, соответствующего реальным горно-геологическим условиям [29–35]. Испытательная система трехосного независимого нагружения позволяет проводить независимое трехосное предельно «жесткое» или предельно «мягкое» сжатие (управление по силе или по перемещению) кубических образцов с ребром 30, 40 или 50 мм по траекториям в виде многозвенных ломаных с регистрацией деформаций и напряжений по трем взаимно ортогональным направлениям и измерением в ходе испытания проницаемости материала в направлении одной из осей. Максимальные параметры нагружения испытательной системы трехосного независимого нагружения: усилие 500 кН, деформация 20 %, скорость нагружения 10 МПа/с и скорость перемещения 3 мм/с.

2. Постановка эксперимента на сложное неравнокомпонентное сжатие

Для анализа закономерностей процессов накопления повреждений при сложном неравнокомпонентном сжатии была изготовлена серия кубических образцов песчаника Верхнекамского (Березниковско-Соликамского) региона с размером ребра 40 мм. Образцы были изготовлены с высокой точностью: непараллельность граней не превышала 20 мкм. Это, а также использование фторопластовых прокладок с нанесенным тонким слоем смазки минимизировало трение и кромочные эффекты, обеспечило однородное напряженно-деформированное состояние в образцах при испытаниях. Перед испытанием грани образцов шлифовались для по-

вышения площади их соприкосновения с нагружающими плитами.

Реализация программы сложного нагружения песчаника предполагала деформирование серии образцов (рис. 1) со свободными от напряжений гранями, перпендикулярными оси x_3 , в два этапа. На первом этапе образцы подвергались действию равнокомпонентного предельно «мягкого» двухосного сжатия до давления 11 МПа в направлениях x_1 и x_2 . На втором этапе по оси x_1 поддерживалось постоянное давление 11 МПа, а по оси x_2 осуществлялось «жесткое» кинематическое сжатие со скоростью 10^{-6} мм/с. Грани образцов, ориентированные по нормали к оси x_3 , были свободными от напряжений в течение всего эксперимента.

Регистрация дискретной акустической эмиссии в процессе сложного двухосного неравнокомпонентного сжатия проводилась с использованием восьмиканального программно-аппаратного комплекса Amsy-6 (Val-len, Германия) с предусилителями АЕР4 (коэффициент усиления 34 дБ) и преобразователями акустической эмиссии двух типов. Для регистрации сигналов акустической эмиссии на свободной грани образца использовались миниатюрные преобразователи М-31 (Fujicera, Япония) с плоской амплитудно-частотной характеристикой в интервале 300–800 кГц (датчики акустической эмиссии 1 и 2), которые крепились на образце при помощи цианакрилатного клея (рис. 1). Для регистрации акустической эмиссии на нагружающей плите испытательной системы трехосного независимого нагружения применялся широкополосный преобразователь 2SMEG-P (Deci, США), работающий в диапазоне 200–2000 кГц (датчик 3), который устанавливался на плите при помощи вакуумной смазки. Запись волновых форм акустической эмиссии в процессе испытаний образцов песчаника осуществлялась с частотой дискретизации 10 МГц. Для выделения одиночных импульсов на фоне шумов различной природы регистрировалась акустическая эмиссия с фиксированным порогом отсека по амплитуде 37 дБ. После испытания проводилась многопараметрическая фильтрация полученных дан-

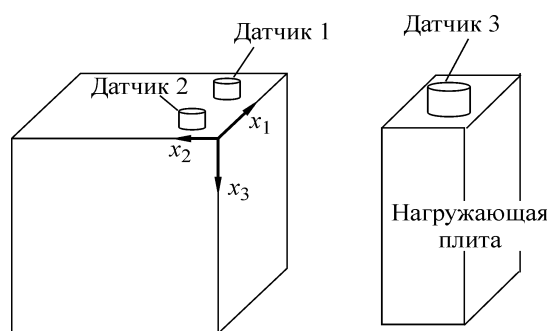


Рис. 1. Схема расположения датчиков акустической эмиссии на образце и плите испытательной системы трехосного независимого нагружения

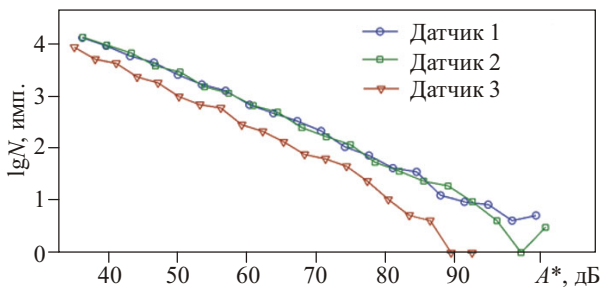


Рис. 2. Распределение импульсов акустической эмиссии по максимальной амплитуде, зарегистрированных разными датчиками (цветной в онлайн-версии)

ных акустической эмиссии для удаления импульсов, связанных с механическими шумами нагружающего устройства.

3. Закономерности акустической эмиссии при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника

На рис. 2 представлены распределения по максимальной амплитуде импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных датчиками в течение всей программы нагружения одного из образцов песчаника. Как видим, распределения для датчиков 1 и 2 идентичны друг другу (за исключением высокоамплитудного диапазона). Последнее вызвано ярко выраженной неоднородностью материала при формировании крупных дефектов на этапе, предшествующем макроразрушению. На плите испытательной системы трехосного независимого нагружения, которая перпендикулярна оси x_2 (датчик 3), зарегистрировано меньшее количество импульсов, чем на образцах. Изгиб кривой (датчик 3) в области высоких амплитуд связан, по-видимому, с ослаблением сигнала при прохождении границы раздела «образец – плита».

Графики повторяемости (закон Гутенберга–Рихтера) импульсов акустической эмиссии, построенные для максимальных амплитуд (рис. 3), являются универсальным инструментом для определения относительного

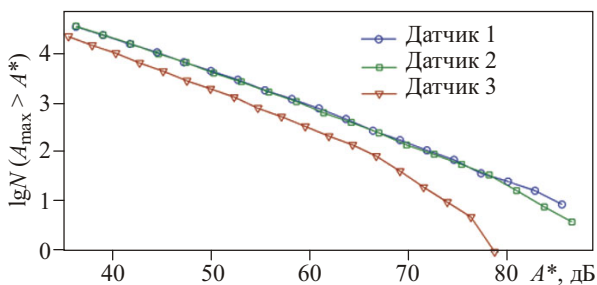


Рис. 3. Повторяемость для максимальных амплитуд импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных разными датчиками (цветной в онлайн-версии)

распределения импульсов акустической эмиссии по амплитудам и, как правило, имеют степенной вид (это отражает масштабную инвариантность процесса накопления повреждений в твердых телах [36, 37]). Для импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных датчиками 1 и 2, графики повторяемости в логарифмических координатах линейны с одинаковыми постоянными углами наклона. Для датчика 3 наклон графика повторяемости уменьшается в области высоких амплитуд.

Для выявления частотных характеристик зарегистрированных импульсов акустической эмиссии был проведен спектральный анализ их волновых форм с использованием дискретного оконного преобразования Фурье. Все волновые формы обрабатывались фильтром с полосой пропускания 250–850 кГц, после чего для окна Хэмминга с размером 204 мс проводилось дискретное преобразование Фурье (начало окна соответствует началу импульса акустической эмиссии). На рис. 4 представлены гистограммы распределений импульсов акустической эмиссии по медианной частоте, которые показывают, что для датчиков 1 и 2 распределение является

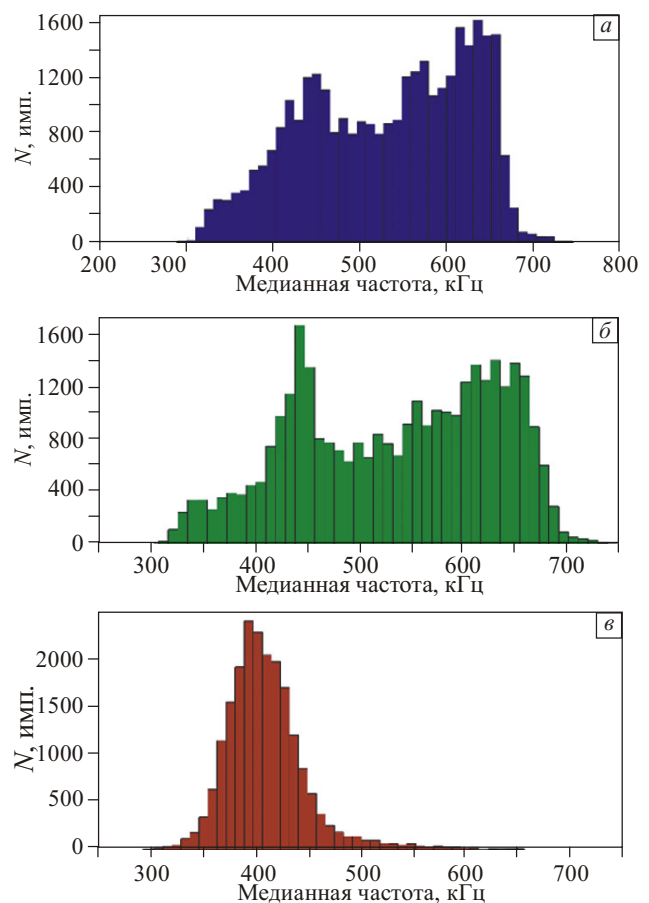


Рис. 4. Гистограмма распределения импульсов акустической эмиссии по медианной частоте: датчики 1 (а), 2 (б) и 3 (в) (цветной в онлайн-версии)

бимодальным с максимумами на частоте 440 и 650 кГц (рис. 4, *а* и *б*). Распределение для датчика 3 было уни-модальным с максимумом, смещенным к медианной частоте 400 кГц (рис. 4, *в*). Еще одной отличительной особенностью сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных датчиком 3, является минимальное количество импульсов с медианной частотой, превышающей 550 кГц. Последнее связано с трансформацией сигнала при переходе через границу «образец – плита».

Существенное различие между данными акустической эмиссии, полученными с помощью датчиков 1, 2 и 3, наблюдается также для частоты максимума спектра, характеризующего несущую, или опорную частоту сигнала акустической эмиссии (рис. 5). Для датчиков, установленных на образцах, наблюдается разделение сигналов по частоте максимума спектра на три характерных интервала: 210–280, 300–460 и 550–850 кГц. Для

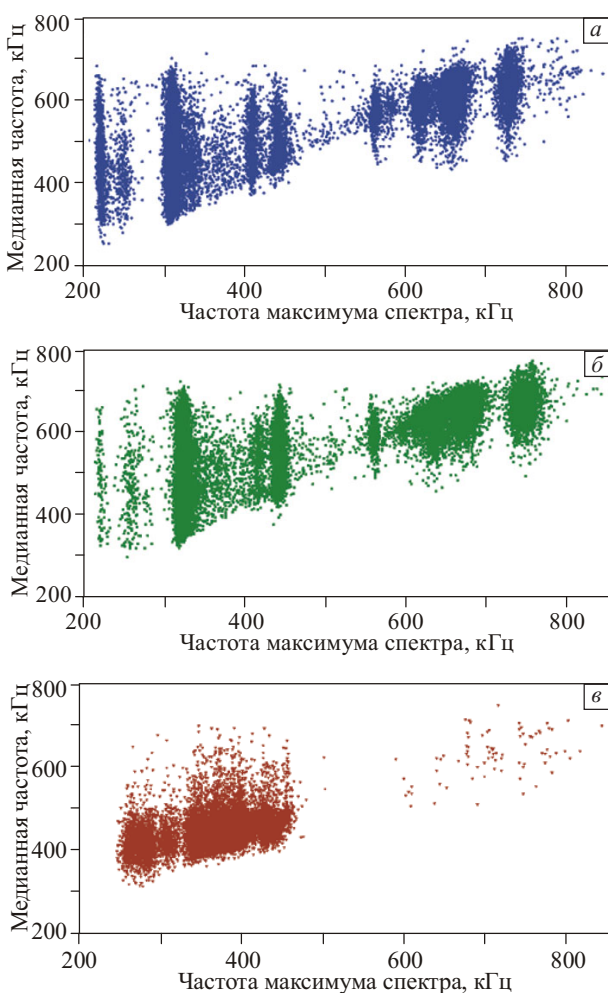


Рис. 5. Диаграмма зависимости медианной частоты от частоты максимума спектра для импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных датчиками 1 (*а*), 2 (*б*) и 3 (*в*). Точка — отдельный импульс акустической эмиссии (цветной в онлайн-версии)

датчика, закрепленного на нагружающей плите испытательной системы, преобладающее количество импульсов акустической эмиссии имело частоту максимума спектра в диапазоне 250–470 кГц и незначительное количество импульсов частоты выше 600 кГц.

Как видим, на плите испытательной системы трехосного независимого нагружения при неравнокомпонентном сжатии для каждого из испытанных образцов регистрировалось меньшее количество сигналов акустической эмиссии. Амплитудный состав регистрируемых импульсов в целом соответствует данным, полученным с датчиков, закрепленных на образцах. Исключение составляет относительное уменьшение (по сравнению с датчиками 1 и 2) высокоамплитудных сигналов.

Частотный анализ волновых форм позволил установить, что регистрируемые на плите испытательной системы трехосного независимого нагружения во время проведения экспериментов импульсы акустической эмиссии являются более низкочастотными (по сравнению с характеристиками сигналов, полученными датчиками 1 и 2) с опорной частотой, не превышающей 500 кГц. Выявленные отличия являются следствием различия акустических импедансов образцов и плиты и определяются дисперсией, рассеиванием и ослаблением сигнала в процессе его распространения в системе «образец – плита». На рис. 6 представлено визуальное подтверждение найденных отличий — характерные волновые формы импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных на одном из образцов и плите.

На рис. 7 представлены совмещенные временные зависимости нормальных напряжений σ_2 и суммарного счета акустической эмиссии, зарегистрированного на свободной поверхности одного из образцов песчаника и плите испытательной системы трехосного независимого нагружения при сложном неравнокомпонентном сжатии. Деформирование песчаника на стадиях упруго-

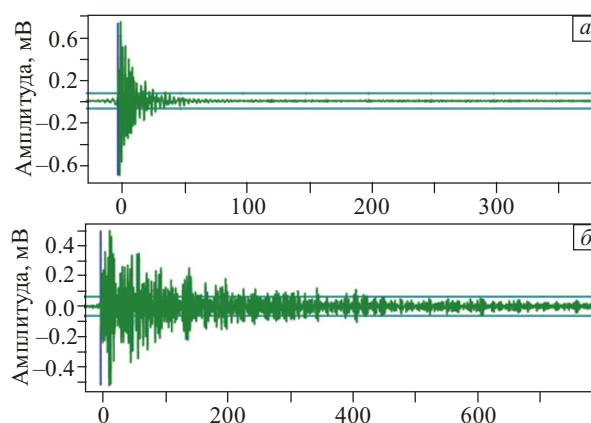


Рис. 6. Характерные волновые формы импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных датчиками 1 (*а*) и 3 (*б*) (цветной в онлайн-версии)

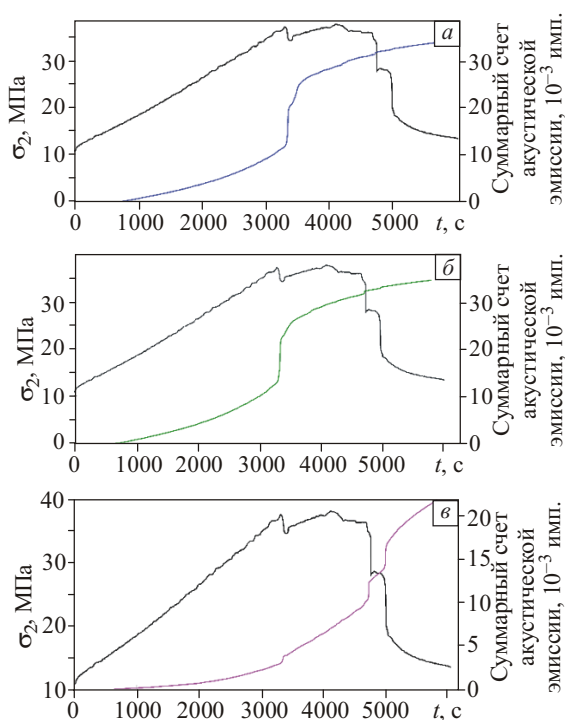


Рис. 7. Совмещенные временные зависимости напряжения σ_{22} и суммарного счета акустической эмиссии, зарегистрированного датчиками 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

го деформирования и упрочнения характеризуется монотонным ростом суммарного количества импульсов акустической эмиссии, зарегистрированных каждым из датчиков. Падение напряжений на 3200 с сопровождается резким ростом суммарного счета акустической эмиссии. Это эффект более выражен для датчиков, которые были закреплены на образцах, чем на плите. После этого наблюдается постепенное уменьшение активности акустической эмиссии для датчиков 1 и 2 с одновременным постепенным ростом активности для датчика 3. Такое отличие в динамике сигналов акустической эмиссии связано с перестройкой дефектной подсистемы песчаника: формированием системы полос локализованной деформации, появлением и дискретным скачкообразным ростом макродефекта, в результате чего наблюдалось расслоение и фрагментация образца, и, как следствие, постепенным выпучиванием свободной от напряжений грани вверх. Последнее, в свою очередь, изолировало установленные на ней датчики акустической эмиссии от основного неповрежденного объема песчаника. Обратим внимание на то, что датчик 3, установленный на плите испытательной системы трехосного независимого нагружения, не теряет свою чувствительность, а зарегистрированные им данные отражают характер процесса накопления повреждений, локализации разрушения на стадии деформационного

разупрочнения, формирования условий макроразрушения вплоть до снижения напряжений σ_{22} до начального уровня в 11 МПа [38, 39].

Зависимость активности акустической эмиссии, зарегистрированной различными датчиками при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника, от времени показывает, что при первом падении напряжений σ_{22} количество сигналов на одном из испытанных образцов в 8 раз выше (400 имп./с на датчиках 1 и 2, 50 имп./с на датчике 3), чем активность акустической эмиссии, зарегистрированная на плите испытательной системы трехосного независимого нагружения (рис. 8). На стадии деформационного разупрочнения отклик акустической эмиссии на падение σ_{22} , регистрируемый датчиком 3, в несколько раз больше.

Для исследования изменения частотного состава акустической эмиссии, регистрируемой при деформировании песчаника, были построены зависимости медианной частоты и частоты максимума спектра для каждого из датчиков от времени деформирования (рис. 9 и 10). Анализ полученных зависимостей показал, что сбросы напряжения, вызванные резкой перестройкой дефектной подсистемы песчаника, сопровождаются увеличением вариативности частотных характеристик акустической эмиссии (вертикальные линии на зависимостях), регистрируемых всеми датчиками. При этом для датчиков 1 и 2 характерно уменьшение количества высокочастотных импульсов акустической

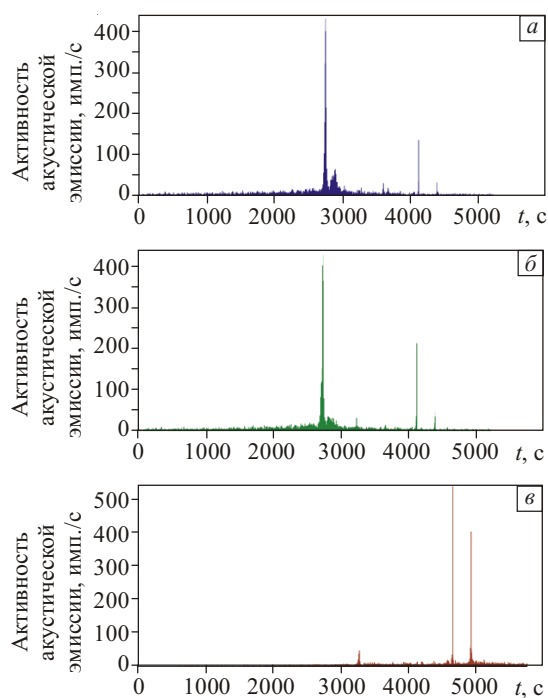


Рис. 8. Активность акустической эмиссии, зарегистрированной датчиками 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

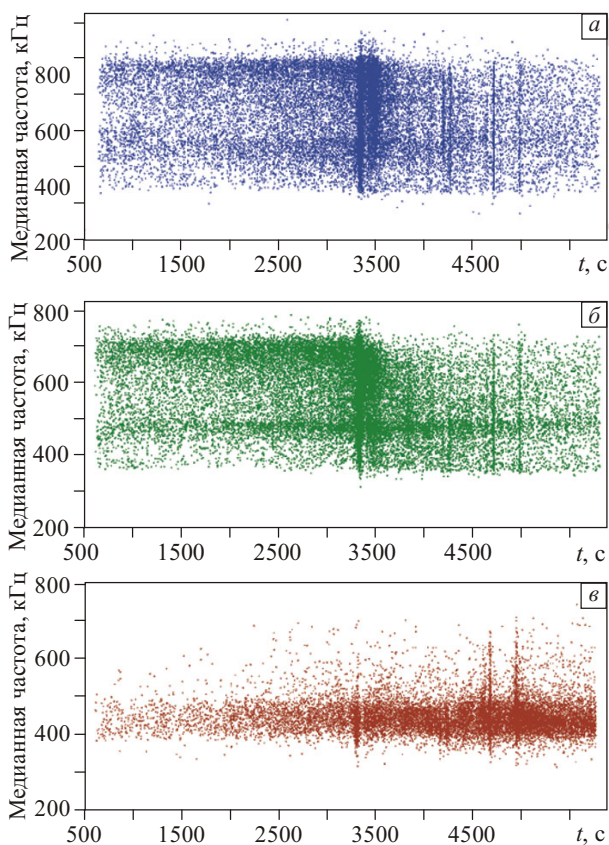


Рис. 9. Зависимость медианной частоты от времени импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной датчиками 1 (а), 2 (б) и 3 (в) (цветной в онлайн-версии)

эмиссии на стадии деформационного разрушения, тогда как для датчика 3 наблюдается расширение диапазона частотных характеристик акустической эмиссии вплоть до отработки программы нагружения и остановки эксперимента. Установленные закономерности вариации частотных параметров акустической эмиссии на закритической стадии, как это отмечено ранее, вызваны нарушением сплошности образцов из-за формирования системы полос локализованной деформации, появления макродефекта, которые приводят к изоляции датчиков 1 и 2 от основного объема материала.

4. Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование процесса накопления повреждений при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника на испытательной системе трехосного независимого нагружения с *in situ* регистрацией дискретных импульсов акустической эмиссии на нагружающей плите и свободной от напряжения грани кубических образцов. Сравнительный анализ данных акустической эмиссии, зарегистрированных на образцах и плите, позволил установить

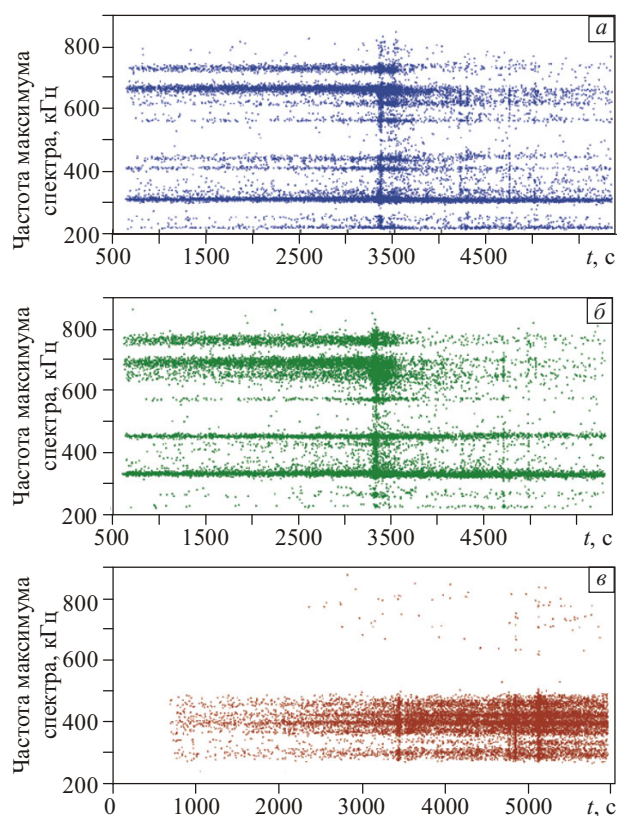


Рис. 10. Зависимость частоты максимума спектра от времени импульсов акустической эмиссии, зарегистрированной датчиками 1 (а), 2 (б) и 3 (в) (цветной в онлайн-версии)

качественное соответствие изменения интегрального (суммарный счет) и дифференциального (активность акустической эмиссии) параметров в процессе деформирования песчаника. При этом на плите регистрируется меньшее количество импульсов акустической эмиссии, но амплитудный состав соответствует данным, получаемым с датчиков, размещенных на образцах, за исключением относительного уменьшения высокоамплитудных сигналов. Частотный анализ волновых форм всех зарегистрированных импульсов акустической эмиссии позволил установить, что в отличие от регистрируемых на образцах импульсы акустической эмиссии, получаемые по каналам датчиков, закрепленных на плите, являются более низкочастотными (опорная частота не превышает 500 кГц). Выявленные отличия являются следствием различия акустических импедансов образцов и плиты, определяются дисперсией, рассеиванием и ослаблением сигнала в процессе его распространения в системе «повреждаемый образец – плита».

Проведенные эксперименты доказали принципиальную возможность регистрации акустической эмиссии при истинно трехосном нагружении горных пород, ко-

гда закрытый со всех сторон кубический образец сжимается независимо по трем осям в соответствии с заданной программой нагружения и/или деформирования. Это открывает новые перспективы для исследования механизмов разрушения осадочных, магматических и метаморфических горных пород при произвольных траекториях трехосного нагружения в виде многозвенных ломаных на основе анализа данных акустической эмиссии. Кроме того, размещение датчика на плите позволяет регистрировать сигналы акустической эмиссии на этапах локализации, фрагментации и роста макродефекта, когда наблюдается существенное нарушение сплошности образца. Это дает возможность получать информацию о характере эволюции повреждений даже на стадии деформационного разупрочнения и открывает новые перспективы для исследования процесса накопления повреждения при трехосном пропорциональном и непропорциональном нагружении горных пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-Урал № 17-41-590148).

Литература

1. 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.
2. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
3. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 7. – С. 6–18.
4. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К., Шатмиров Ж.К., Эмильбеков Б.Э. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – № 12. – С. 2182–2186.
5. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кареев А.Е. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 34–41.
6. Матвиенко Ю.Г., Фомин А.В., Иванов В.И., Северов П.Б., Васильев И.Е. Комплексное исследование дефектов в композиционных материалах с применением хрупких тензопокрывтий и акустической эмиссии // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 1. – С. 46–50.
7. Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Вестн. науки Сибири. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 129–138.
8. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Klyuchkin V.N. On the structure of acoustic emission of model samples in response to an external energy action // Izv. Phys. Solid Earth. – 2006. – V. 42. – No. 10. – P. 824–829. – doi 10.1134/S1069351306100065.
9. Буило С.И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твердых тел // Дефектоскопия. – 2002. – № 2. – С. 48–53.
10. Ботвина Л.Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. – 2011. – № 10. – С. 5–18.
11. Томили Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И. Разрушение горных пород как многоуровневый процесс // Физика Земли. – 2005. – № 8. – С. 69–78.
12. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Кадомцев А.Г., Наймарк О.Б. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатии // ФТТ. – 2017. – Т. 59. – № 5. – С. 920–930.
13. Damaskinskaya E., Frolov D., Gafurova D., Korost D., Panteleev I. Criterion for fracture transition to critical stage // Interpretation. – 2017. – V. 5. – No. 4. – P. SP1–SP8.
14. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии // Физ. мезомех. – 2016. – Т. 19. – № 4. – С. 64–73. – doi 10.24411/1683-805X-2016-00008.
15. Panteleev I., Naimark O., Mubassarova V., Damaskinskaya E., Bogomolov L. Influence of weak electric field on spatial-temporal dynamics of damage evolution during granite deformation // AIP Conf. Proc. – 2015. – V. 1683. – P. 020177.
16. Мубассарова В.А., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Пантелеев И.А., Наймарк О.Б. Особенности локализации деформации и распределения очагов акустической эмиссии в образцах горных пород под воздействием одноосного сжатия и электрических импульсов // Geodynam. Tectonophys. – 2014. – V. 5. – No. 4. – P. 919–938.
17. Кривошеев И.А. Метод связанных диполей для локации источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 2007. – № 6. – С. 60–64.
18. Мирошников В.И., Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Аникин П.А. Влияние скоростной анизотропии массива горных пород со сложной структурой на точность локации акустической эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Т. 4. – № 12. – С. 125–135.
19. Растегаев И.А., Данюк А.В., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Чугунов А.В. Локация шумоподобных источников акустической эмиссии способом спектрального подобию // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 3–13.
20. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С. Методика локации сигналов акустической эмиссии при статических испытаниях образцов из углепластика // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 53–62.
21. Barre S., Benzeggagh M. On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene // Composites Sci. Technol. – 1994. – V. 52. – No. 3. – P. 369–376.
22. Литаврин И.В. Локация зон акустической эмиссии горных пород // Горные ведомости. – 2013. – Т. 111. – № 8. – С. 56–62.
23. Pashmforoush F., Fotouhi M., Ahmadi M. Acoustic emission-based damage classification of glass/polyester composites using harmony search k-means algorithm // J. Reinforc. Plast. Compos. – 2012. – V. 31. – P. 671–680.
24. Godin N., Huguet S., Gaertner R., Salmon L. Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers // NDT E Int. – 2004. – V. 37. – P. 253–264.
25. Marec A., Thomas J.-H., El Guerjouma R. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // Mech. Syst. Signal Proc. – 2008. – V. 22. – P. 1441–1464.
26. Suzuki M., Nakanishi H., Iwamoto M., Jinen E. Application of Static Fracture Mechanisms to Fatigue Fracture Behavior of Class ASMC Composite // Proc. 4th Japan–US Conf. on Composite Materials. – 1988. – P. 297–306.
27. Arumugam V., Kumar C.S., Santulli C., Sarasini F., Stanley A.J. A global method for the identification of failure modes in fiberglass using acoustic emission // J. Test. Evaluation. – 2011. – V. 39. – No. 5. – P. 954–966.
28. Li L., Lomov S.V., Xiong Yan, Carvelli V. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites // Composite Struct. – 2014. – V. 116. – P. 286–299.

29. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Степанова Е.В., Устинов К.Б. Моделирование фильтрации флюида в скважину на больших глубинах с учетом анизотропии прочностных свойств пород коллектора // Процессы в геосредах. – 2017. – Т. 11. – № 2. – С. 512–521.
30. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Степанова Е.В. Установка для истинно-трехосных испытаний горных пород // Новые материалы: Сб. материалов. – 2016. – С. 247–249.
31. Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // Изв. РАН. МТТ. – 2016. – № 5. – С. 15–21.
32. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Экспериментальное исследование влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород // Изв. РАН. МТТ. – 2015. – № 6. – С. 39–48.
33. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Механико-математическое и экспериментальное моделирование устойчивости скважин в анизотропных геосредах // Изв. РАН. МТТ. – 2013. – № 4. – С. 4–12.
34. Сидорин Ю.В., Устинов К.Б., Сиротин А.А., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И., Зайцев А.В. Экспериментальное исследование деформирования горных пород в условиях плоской деформации и плоского напряженного состояния // Процессы в геосредах. – 2016. – Т. 6. – № 2. – С. 148–155.
35. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Triaxial Loading System as a Tool for Solving Problems of Oil and Gas Production // True Triaxial Testing of Rocks. – Leiden: CRC Press/Balkema. – P. 301–310.
36. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 26–36.
37. Дамаскинская Е.Е., Кадомцев А.Г. Отклонение от закона Гутенберга–Рихтера // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – № 2. – С. 29–35.
38. Shevtsov N., Zaitsev A., Panteleev I. Deformation and Destruction of Rocks on the True Triaxial Loading System with Continuous Acoustic Emission Registration // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018): 4th Int. Sci. School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences / Ed. by V.I. Karev, D. Klimov, K. Pokazeev. – Cham, Switzerland: Springer Nature, 2019. – P. 424–432.
39. Шевцов Н.И., Зайцев А.В., Пантелеев И.А. Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // Процессы в геосредах. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 129–136.

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.,
после доработки 05.06.2019 г.,
принята к публикации 17.06.2019 г.

Сведения об авторах

Пантелеев Иван Алексеевич, к.ф.-м.н., снс ИМСС УрО РАН, pia@icmm.ru
Коваленко Юрий Федорович, д.ф.-м.н., зав. лаб. ИПМех РАН, perfolinkgeo@yandex.ru
Сидорин Юрий Васильевич, к.ф.-м.н., снс ИПМех РАН, sidorin@ipmnet.ru
Зайцев Алексей Вячеславович, к.ф.-м.н., доц. ПНИПУ, a-zaitsev@mail.ru
Карев Владимир Иосифович, д.т.н., зам. дир. ИПМех РАН, wikarev@ipmnet.ru
Устинов Константин Борисович, д.ф.-м.н., доц., внс ИПМех РАН, ustino127@mail.ru
Шевцов Николай Иванович, асп., мнс ИПМех РАН, red3991@yandex.ru