

УДК 534-16
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-4-189-197

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ И СТУПЕНЧАТОМ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Д.С. Кульков, В.Н. Сычев

Аннотация. Акустическая эмиссия регистрировалась в процессе одноосного сжатия образцов различных геоматериалов. Эксперименты осуществлялись на малошумной рычажной установке с водяным натеканием, максимальная нагрузка на образец не превышала 250 кН. Часть образцов испытывалась при непрерывно возрастающей нагрузке, другая – при ее ступенчатом изменении. Исследовалось распределение сигналов акустической эмиссии по энергиям. В качестве энергетической характеристики акустической эмиссии служил квадрат максимальной амплитуды сигнала. Величина деформации образца при ступенчатом нагружении более чем в два раза превышала данный показатель для непрерывного нагружения. Суммарная эмиссия почти в четыре раза больше при ступенчатом режиме нагружения. Активность АЭ также выше в 2 раза при ступенчатом нагружении, причем максимальные значения активности наблюдались не во время пригрузок, как можно было ожидать, а на самих ступеньках, при постоянной величине усилия сжатия. Выявлено уменьшение крутизны линейной части графиков повторяемости для конкретного геоматериала при смене режима нагружения от линейного к ступенчатому, что означает увеличение доли более высокоэнергетических событий при ступенчатом изменении нагрузки. Следовательно, вероятность образования укрупненного дефекта при ступенчатом нагружении горных пород выше, чем при ее непрерывном нарастании. То есть, при ступенчатом режиме нагружении в горных породах облегчается локализация дефектов, повышается энергия акустической эмиссии и склонность материала к хрупкому разрушению.

Ключевые слова: одноосное сжатие; непрерывное нагружение; ступенчатое нагружение; хрупкое разрушение; акустическая эмиссия; график повторяемости; b-value.

ТОО ТЕКТЕРИН ҮЗГҮЛТҮКСҮЗ ЖАНА БАСКЫЧТУУ БИР ОКТУУ ЖҮКТӨӨДӨ АКУСТИКАЛЫК ЭМИССИЯ

Д.С. Кульков, В.Н. Сычев

Аннотация. Акустикалык эмиссиялар ар түрдүү геоматериалдардын үлгүлөрүн бир октук кысуу учурунда катталган. Эксперименттер аз ызы-чуу чыгаруучу суу басымы менен иштеген рычаг орнотмосунда жүргүзүлүп, үлгүгө максималдуу жүк 250 кН ашкан эмес. Үлгүлөрдүн бир бөлүгү жүктөм үзгүлтүксүз көбөйүп турган учурда, экинчиси анын баскычтуу өзгөрүүсүндө сыналды. Акустикалык эмиссия сигналдарынын энергия боюнча бөлүштүрүлүшү изилденген. Сигналдын максималдуу амплитудасынын квадраты акустикалык эмиссиянын энергетикалык мүнөздөмөсү катары кызмат кылган. Баскычтуу жүктөөдө үлгүнүн деформациясынын чоңдугу үзгүлтүксүз жүктөө үчүн берилген көрсөткүчтөн эки эсе көп болгон. Жалпы эмиссия баскычтуу жүктөө режиминде дээрлик төрт эсе көп. Баскычтуу жүктөөдө акустикалык эмиссиялардын активдүүлүгү да 2 эсе жогору, ал эми максималдуу активдүүлүктүн мааниси күтүлгөндөй кошумча жүктөмдөрдүн учурунда эмес, баскычтардын өзүндө, туруктуу кысуу күчүнүн чоңдугунда байкалган. Жүктөө режими сызыктуудан баскычтууга өткөндө белгилүү бир геоматериал үчүн кайталануу графиктеринин сызыктуу бөлүгүнүн жантайышынын азайышы аныкталган, бул жүктүн этап-этабы менен өзгөрүшү менен жогорку энергиялуу окуялардын үлүшүнүн көбөйүшүн билдирет. Демек, тоо тектерин баскычтуу жүктөөдө ирилештирилген кемчиликтин пайда болуу ыктымалдыгы анын тынымсыз өсүшүнө караганда жогору. Башкача айтканда, тоо тектериндеги жүктөөнүн баскычтуу режиминде кемчиликтерди локалдаштыруу жеңилдейт, акустикалык эмиссиянын энергиясы жана материалдын морт сынууга жакындыгы жогорулайт.

Түйүндүү сөздөр: бир октуу кысуу; үзгүлтүксүз жүктөө; баскычтуу жүктөө; морт бузулуу; акустикалык эмиссия; кайталануучу график; b-value.

ACOUSTIC EMISSION UNDER CONTINUOUS AND STEPWISE UNIAXIAL LOADING OF ROCKS

D.S. Kulkov, V.N. Sychev

Abstract. Acoustic emissions recorded during uniaxial compression of samples of various geomaterials. The experiments were carried out on a low-noise lever unit with water flow, the maximum load on the specimen did not exceed 250 kN. A part of specimens tested at continuously increasing load, the other part at its stepwise change. The energy distribution of acoustic emission signals investigated. The square of the maximum amplitude of the signal served as the energy characteristic of acoustic emission. The magnitude of the sample deformation under stepwise loading was more than twice as high as for continuous loading. The total emission is almost four times greater under stepwise loading. AE activity is also 2 times higher under step loading, and the maximum values of activity observed not during loading, as could be expected, but on the steps themselves, at a constant value of compression force. A decrease in the steepness of the linear part of the recurrence plots for a particular geomaterial when changing the loading regime from linear to step loading revealed, which means that the proportion of higher energy events increases with step loading. Consequently, the probability of formation of an enlarged defect at stepwise loading of rocks is higher than at its continuous increase. That is, the stepwise mode of loading in rocks facilitates the localisation of defects, increases the acoustic emission energy and the tendency of the material to brittle fracture.

Keywords: uniaxial compression; continuous loading; step loading; brittle fracture; acoustic emission; repeatability graph; b-value.

Введение. Породы вокруг горных выработок находятся под действием совокупности статических и динамических нагрузок, нередко приводящих к их разрушению. К последним, в частности, относятся различные повторяющиеся и импульсные воздействия природного и техногенного характера, которые необходимо учитывать при строительстве и эксплуатации горнотехнических сооружений. Также известно, что пластичные горные породы лучше противостоят отрыву, разрушаясь преимущественно касательными напряжениями, в то время как хрупкие породы легче разрушаются растягивающими напряжениями. Однако и в том, и в другом случае заметную роль играют условия, в которых происходит деформация горных пород, поскольку их свойства проявляются не только как особенности самого материала, но и существенно зависят от условий нагружения [1–3].

На практике реальную угрозу обычно представляет хрупкое разрушение, будь то конструкционные материалы или горные породы, поэтому важно своевременно определить характер готовящегося разрушения. В частности, большую опасность может представлять хрупкое разрушение горных пород, реализуемое в условиях, когда нагруженный сравнительно жесткий элемент находится в достаточно податливом окружении. Часто в подобной ситуации находятся породные целики, поддерживающие кровлю в горных выработках. Близкой моделью отдельно стоящего целика лабораторного масштаба может служить породный образец, одноосно нагруженный на прессе.

Деформирование и разрушение горных пород, как правило, сопровождается акустической эмиссией (АЭ), которая возникает при образовании и росте трещин. В связи с этим, представляет определенный интерес исследование акустической эмиссии (АЭ), как лабораторного аналога сейсмических эффектов при крупномасштабном разрушении горных пород в виде горных ударов и землетрясений.

В связи с этим, целью настоящей работы является обсуждение некоторых особенностей энергетических показателей АЭ, имеющих отношение к характеру разрушения пластичных и хрупких горных пород, проявившихся в испытаниях на одноосное сжатие при непрерывно нарастающей нагрузке и ее ступенчатом увеличении.

Описываемые эксперименты проводили при непрерывном, квазилинейном и ступенчатом нагружении образцов на мягкой реологической установке с рычажным механическим приводом [4]. Объектами исследований служили три разновидности горных пород, отличающихся по своему составу, генезису, физико-механическим свойствам и склонности к хрупкому разрушению. Пластичные породы представлены крупнозернистым мономинеральным мрамором, гранитом и песчаником, отобранными на месторождениях КР.

Продолжительность отдельного эксперимента составляла около 40 часов. Автоматическую регистрацию АЭ, действующей нагрузки и деформации образца осуществляли с помощью персонального компьютера. Измерительная аппаратура работала в ждущем режиме. Программный цикл регистрации запускался по приходу АЭ события, удовлетворяющего амплитудным условиям отбора. Порог амплитудной дискриминации устанавливался минимально возможным, обеспечивающим надежную отстройку от помех по амплитуде.

При обработке и анализе результатов экспериментов использовали подходы и закономерности, развитые в сейсмологии. Основанием для их применения к сигналам АЭ служат представления о самоподобии процессов разрушения горных пород на различных масштабных уровнях [5]. В частности, данные представления предполагают использование метода АЭ при изучении процесса трещинообразования в лабораторных условиях при одноосном сжатии горных пород. Энергетические показатели АЭ, регистрируемой в процессе деформирования и разрушения однородных и неоднородных материалов, рассматривались ранее в работах [6–8]. Последующие исследования АЭ, проведенные с применением более совершенных технических средств, также подтвердили эффективность лабораторного моделирования условий, характерных для сейсмогенерирующих зон земной коры [9–12]. В частности, в них было показано, что функция распределения сигналов АЭ по энергиям подобна распределению сейсмических событий, описываемых законом Гутенберга–Рихтера [13]:

$$P(E) \sim E^{-\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma \approx \frac{5}{3}$, E – энергия землетрясения [14].

Для суммарного количества событий с магнитудой M , превышающей некоторое пороговое значение m (кумулятивное распределение), закон распределения землетрясений по энергиям принимает вид:

$$N(M > m) \sim 10^{-bm}, \quad (2)$$

где N – обозначает число событий для указанного фиксированного периода времени в заданном географическом регионе; b – константа (b -value), в большинстве случаев принимает значение около 0.9 [15], причем это соотношение выполняется только для линейного участка распределения землетрясений по энергиям.

Если использовать функцию распределения землетрясений по энергиям, то закон Гутенберга–Рихтера описывается линейной функцией вида:

$$\lg N(M) = a - \gamma M, \quad (3)$$

где $N(M)$ – число землетрясений с магнитудами (или классами) не менее M , а a и γ – константы уравнения. Параметр a (a -value) формально описывает сейсмическую активность при $M = 0$, а γ – угловой коэффициент линейной части графика плотности распределения землетрясений (график повторяемости), определяющий скорость уменьшения числа сейсмических событий с ростом их магнитуды.

Аппаратура и методика. Одноосное сжатие породных образцов в экспериментах производили на малозумной рычажной установке с водяным натеканием [4], общий вид которой показан на рисунке 1. Максимальная нагрузка, при которой разрушался образец, не превышала 250 кН. Испытанные образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда, песчаник с квадратным сечением, размерами 25×25×60 мм (Д×Ш×В), гранит и мрамор с прямоугольным сечением, размерами 40×20×80 мм (Д×Ш×В).

Для регистрации сигналов АЭ использовали датчики типа SE-2MEG-P и (DECI, США), имеющие равномерную АЧХ в диапазоне 0.2÷2 МГц, закрепленные на боковой поверхности породного образца. Принимаемые сигналы оцифровывались 8-канальным АЦП USB 3000, разрядностью 14 бит



Рисунок 1 – Общий вид рычажного пресса

с частотой дискретизации 3 МГц. Сигналы, удовлетворяющие условиям амплитудного отбора, регистрировались в ждущем режиме при минимально возможном пороге амплитудной дискриминации, обеспечивающем надежное подавление помех. Волновые формы сигналов в процессе эксперимента сохранялись на жестком диске компьютера для последующей обработки и анализа. Деформации образца в трех взаимно перпендикулярных направлениях измерялась LVDT-датчиками.

Во время экспериментов, каждый из которых продолжался около 40 часов, регистрировалось от 15000 до 40000 различных сигналов, среди которых присутствовали сигналы АЭ, шум и их комбинации [16]. Для выделения сигналов АЭ применяли двухступенчатый программный алгоритм [17, 18]. Как показал анализ волновых форм, основная часть мощности полезного акустического сигнала приходится на ее начальный участок (до ~40 мкс), поэтому за критерий отличия полезного сигнала от шумового, принято отношение мощности волновой формы сигнала на данном отрезке к мощности всего сигнала:

$$P_1 = \frac{\sum_{t=0}^{t_n} S^2}{\sum_{t=0}^{t_{end}} S^2}, \quad (4)$$

где S^2 – мощность сигнала; t_n – длительность начального участка волновой формы (~20–40 мкс); t_{end} – длительность всего сигнала.

На втором этапе рассчитывали отношения сумм амплитудно-частотного спектра в диапазоне от f_n до f_{end} к сумме амплитуд в спектре всего сигнала:

$$P_2 = \frac{\sum_{f_n}^{f_{end}} A}{\sum_{f=0}^{f_{end}} A}, \quad (5)$$

где A – амплитуда спектра; f_n – нижняя граница АЧХ датчика (200 кГц); f_{end} – 1.5 МГц (частота Найквиста, исходя из предела дискретизации АЦП USB 3000–3 МГц).

Диаграмма рассеивания регистрируемых сигналов, построенная по параметрам P_1 и P_2 , состоит из нескольких кластеров, которые относятся к полезным и шумовым сигналам. Это позволяет в автоматизированном режиме выделять полезные сигналы акустической эмиссии из общего массива данных. Из отобранных таким образом волновых форм формировался каталог событий АЭ. В качестве энергетической характеристики для этих сигналов принимался квадрат максимальной амплитуды волновой формы АЭ.

Результаты и обсуждение. В экспериментах часть образцов испытывали при непрерывно возрастающей нагрузке, другая – при ее ступенчатом изменении. В качестве примера рассмотрим типичные результаты испытаний образцов песчаника, которые представлены на рисунках 2 и 3 временными зависимостями изменения величин нагрузки, деформации, активности и накопления сигналов АЭ при непрерывном и ступенчатом нагружении, соответственно.

Как можно увидеть, максимальная нагрузка, при которой наступило разрушение, примерно одинакова в обоих случаях. Несмотря на это, величина деформации образца при ступенчатом нагружении

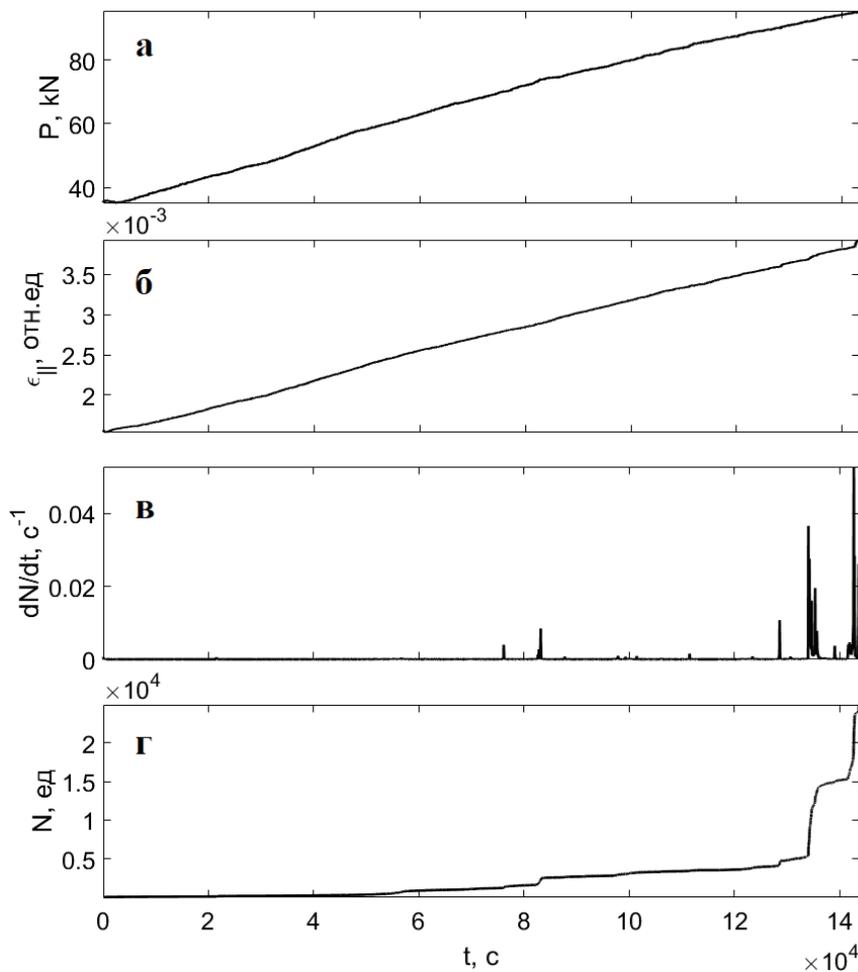


Рисунок 2 – Временные зависимости величин нагрузки (а), деформации (б), активности (в) и накопления (г) сигналов АЭ при непрерывном нагружении песчаника

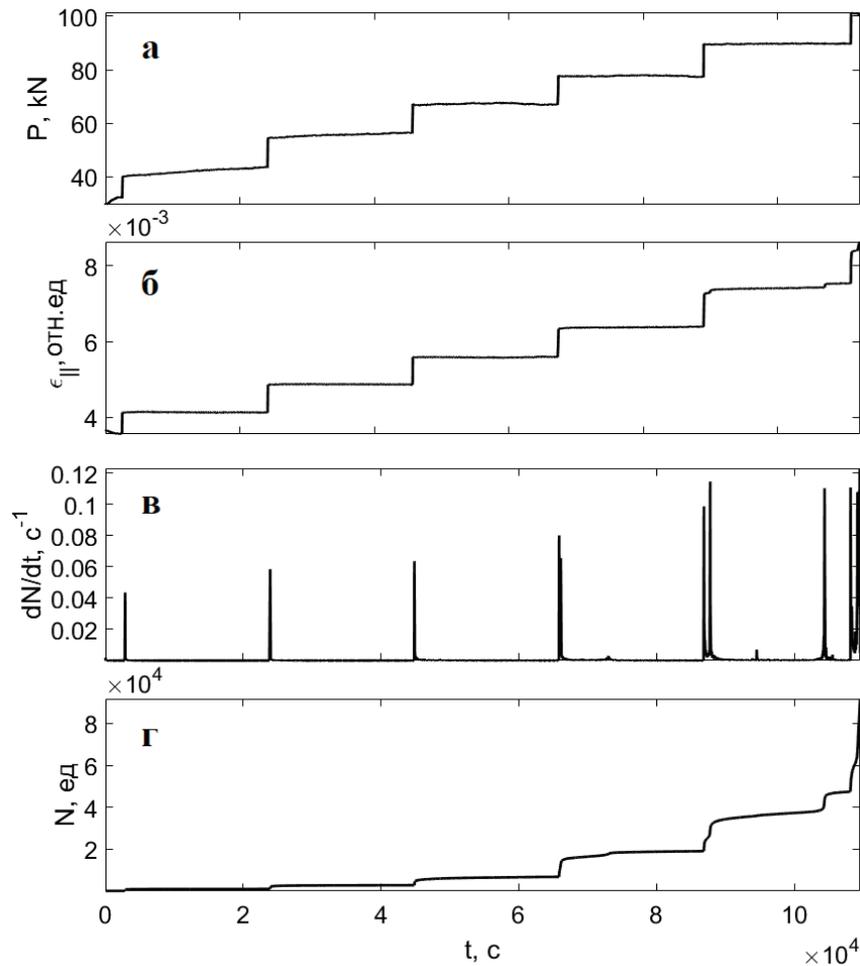


Рисунок 3 – Временные зависимости величин нагрузки (а), деформации (б), активности (в) и накопления (г) сигналов АЭ при ступенчатом нагружении песчаника

более чем в два раза превышает данный показатель для непрерывного нагружения. Также для указанных режимов испытаний заметно отличаются характеристики АЭ. В частности, при ступенчатом нагружении суммарная эмиссия почти в четыре раза больше по сравнению с непрерывным. Активность АЭ также выше в два раза при ступенчатом нагружении, причем максимальные значения активности наблюдались не во время пригрузок, как можно было ожидать, а на самих ступеньках, при постоянной величине усилия сжатия. Представляется, что во время пригрузок песчаник испытывал заметное упрочнение, что затрудняло образование и рост трещин и, соответственно, приводило к усилению АЭ.

В обоих случаях рост активности АЭ наблюдался во второй половине эксперимента, что указывает на интенсивное трещинообразование в материале, несмотря на отсутствие явных признаков готовящегося разрушения на диаграммах нагрузки и продольной деформации образцов. Но при ступенчатом нагружении после последних пригрузок образца, отмечались дополнительные ступеньки деформации, очевидно, связанные с образованием в нем достаточно крупных трещин.

Плотность распределения по энергиям сигналов АЭ, зарегистрированных в ходе двух экспериментальных серий при линейном (а) и ступенчатом (б) изменении нагрузки, приведены на рисунке 4. Можно заметить, что оба распределения, построенные в полулогарифмических координатах,

не являются симметричными. На графиках число сигналов быстро нарастает в области малых энергий, достигая максимума для энергий 5.3 и 4.7 относительных единиц, соответственно, при линейном (а) и ступенчатом (в) нагружении, и затем постепенно убывает по мере роста энергии сигналов. Подобный вид плотности распределений АЭ событий по энергии объясняется, с одной стороны, ограниченной чувствительностью системы регистрации в области слабых сигналов, с другой, естественным дефицитом высокоэнергетических сигналов. Он обусловлен тем, что согласно концентрационной модели разрушения, дефекты данного размера в нагруженном материале образуются путем слияния некоторого количества менее крупных [19].

Распределения в приведенном виде используются на практике сравнительно редко, чаще встречаются традиционные для сейсмологии распределения сейсмических событий по энергии, описываемые законом Гуттенберга–Рихтера, известные как график повторяемости землетрясений. Результаты построений по выражениям (2) и (3) для линейного и ступенчатого нагружения, представлены на рисунке 5.

Благодаря наличию квазилинейного ниспадающего участка в области представительных данных, графики повторяемости удобнее анализировать, чем исходные распределения на рисунке 4. Как видно, крутизна линейной части графиков повторяемости уменьшается при смене режима нагружения от линейного к ступенчатому. То есть, в последнем случае графики повторяемости АЭ становятся более пологими, что означает увеличение доли более высокоэнергетических событий при ступенчатом нагружении. Другими словами, вероятность образования в горных породах укрупненного дефекта при ступенчатой нагрузке выше, чем при ее непрерывном нарастании. Это может быть связано с тем, что доля мелких дефектов, которая принимает участие в укрупнении трещин при активном нагружении, меньше аналогичной доли при ступенчатом нагружении. Поэтому темп накопления укрупненных дефектов в ступенчато нагружаемом образце выше, чем в нагружаемом непрерывно. Это способствует локализации дефектов и повышает вероятность хрупкого разрушения материала при ступенчатом нагружении.

Дополнительную роль при ступенчатой нагрузке может играть деформационное упрочнение материала, повышающее сопротивление материала в области дилатансионного деформирования, и способствующее увеличению энергии АЭ при его разрушении. В частности, двукратное увеличение прочности мрамора наблюдалось одним из авторов при ступенчатом нагружении в процессе длительных экспериментов на релаксацию [20].

Результаты проведенных экспериментов показывают, что наибольшие значения углового коэффициента графиков повторяемости ~ 2 соответствуют мрамору, наименьшие $\sim 1.0 \div 1.3$ песчанику, и промежуточные $\sim 1.2 \div 1.6$ граниту [20]. Следовательно, по степени склонности к хрупкому разрушению испытанные породы могут быть представлены в следующем порядке: песчаник, гранит, мрамор.

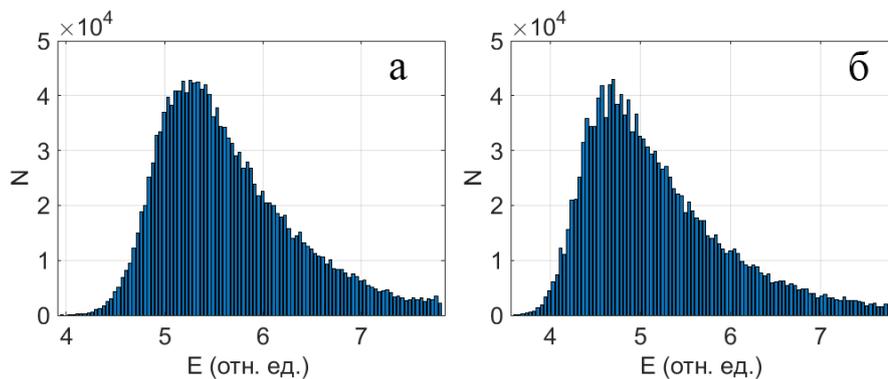


Рисунок 4 – Плотность распределения энергий сигналов АЭ при линейном (а) и ступенчатом (б) нагружении песчаника

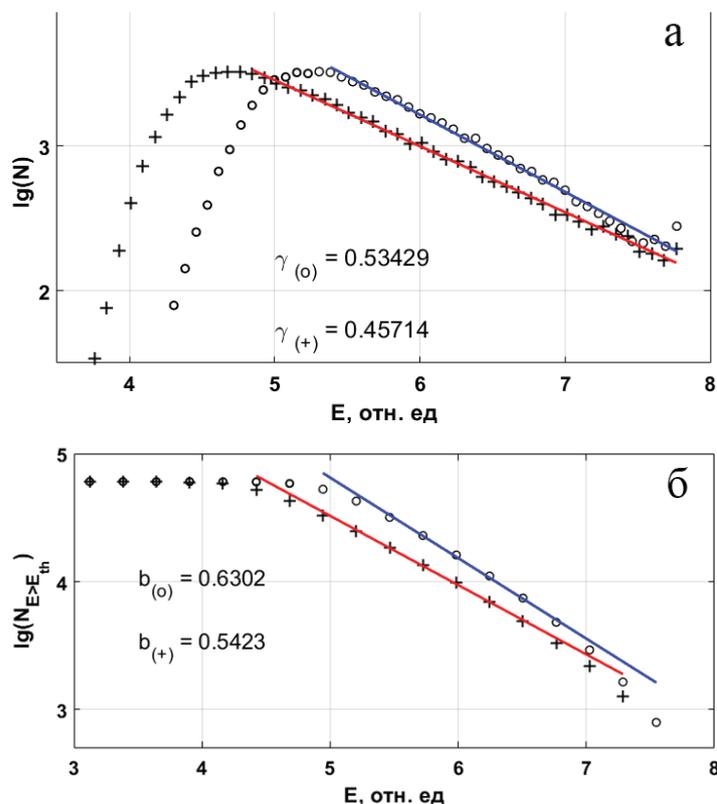


Рисунок 5 – Плотность распределения (а) и кумулятивное распределение (б) сигналов АЭ по энергиям при линейном (о) и ступенчатом (+) нагружении

Заключение. В работе рассмотрены сигналы АЭ, регистрируемые при одноосном сжатии непрерывно нарастающей и ступенчатой нагрузкой горных пород различного генезиса: песчаник, мрамор, гранит. В качестве энергетической характеристики АЭ условно принят квадрат максимальной амплитуды волновой формы зарегистрированного сигнала АЭ.

Выявлено уменьшение крутизны линейной части графиков повторяемости для конкретного геоматериала при смене режима нагружения от линейного к ступенчатому, что означает увеличение доли более высокоэнергетических событий при ступенчатом изменении нагрузки. Это объясняется повышенной вероятностью образования укрупненного дефекта при ступенчатом нагружении горных пород по сравнению с ее непрерывным нарастанием. Следовательно, при ступенчатом нагружении в горных породах облегчается локализация дефектов, и тем самым повышается склонность к хрупкому разрушению материала и энергия АЭ.

Дополнительную роль при ступенчатой нагрузке может играть деформационное упрочнение материала, которое повышает сопротивление материала разрушению, и тем самым способствующее увеличению энергии АЭ.

Согласно полученным результатам, по степени склонности к хрупкому разрушению испытанные породы могут быть представлены в следующем порядке: песчаник, гранит, мрамор.

Исследования выполнены в рамках выполнения государственных заданий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке, тема № АААА-А19-119020190066-3 и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 121022000085-9).

Поступила: 28.03.24; рецензирована: 11.04.24; принята: 15.04.24.

Литература

1. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию / М. Рейнер; пер. с англ. М.: Гостоптехиздат, 1963. 381 с.
2. Белоусов В.В. Экспериментальная тектоника / В.В. Белоусов, М.В. Гзовский. М.: Недра, 1964. 119 с.
3. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. М.: Недра, 1985. 271 с.
4. Закупин А.С. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия / А.С. Закупин, Б.В. Боровский. Пат. 2012148683/28 РФ // БИ. 2015. № 5.
5. Садовский М.А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс / М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко. М.: Наука, 1987. 101 с.
6. Шамина О.Г. Упругие импульсы при разрушении образцов горных пород / О.Г. Шамина // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1956. № 5. С. 513–518.
7. Mogi K. Study of elastic shocks caused by fracture of heterogeneous materials and its relation to the earthquake phenomena / K. Mogi // Bull. Earthq. Res. Inst. 1962. V. 40. № 1. Pp. 125–173.
8. Mogi K. The fracture of a semi-infinite body caused by the inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena / K. Mogi // Bull. Earthq. Res. Inst. 1962a. V. 40. № 4. Pp. 815–868.
9. Виноградов С.Д. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов / С.Д. Виноградов, К.М. Мирзоев, Н.Г. Саломов. Душанбе: Дониш, 1975. 114 с.
10. Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений / С.Д. Виноградов. М.: Наука, 1989. 177 с.
11. Дамаскинская Е.Е. Взаимосвязь пространственной и временной локализации разрушения гетерогенных материалов в рамках двухстадийной модели процесса / Е.Е. Дамаскинская, В.С. Куксенко, Н.Г. Томилини // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясения. М.: ИФЗ. 1993. Т. 11. С. 9–16.
12. Lockner D.L. Observation of quasistatic fault growth from acoustic emissions / D.L. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko et al. // Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. London: Academic Press. 1992. Pp. 3–31.
13. Gutenberg B. Frequency of earthquakes in California / B. Gutenberg, C.F. Richter // Bull. of the Seismological Society of America. 1944. V. 34. Pp. 185–188.
14. Sarlis N.V. Nonextensivity and natural time: The case of seismicity / N.V. Sarlis, E.S. Skordas, P.A. Varotsos // Physical Review E, August 2010. American Physical Society (APS) DOI: 10.1103/physreve.82.021110.
15. Касахара К. Механика землетрясений / К. Касахара. М.: Мир, 1985. 264 с.
16. Кульков Д.С. Анализ сигналов акустической эмиссии в образцах геоматериалов в условиях одноосного сжатия / Д.С. Кульков, С.А. Имашев // Известия Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. 2019. № 2-1 (50). С. 274–280.
17. Чешев М.Е. Методика отбраковки шумовых компонент в сигналах акустической эмиссии горных пород при одноосном сжатии / М.Е. Чешев, Д.С. Кульков // Известия Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. 2019. № 2-1 (50). С. 280–286.
18. Чешев М.Е. Кластерный анализ ключевых признаков акустоэмиссионных сигналов образцов горных пород. Часть 1. Обзор алгоритмов кластеризации / М.Е. Чешев, Д.С. Кульков // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 8. С. 160–164.
19. Журков С.Н. О прогнозировании разрушения горных пород / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров, В.Н. Савельев, У. Султанов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11–18.
20. Sychev V.N. Energy characteristics of acoustic emission under various modes of uniaxial loading / V.N. Sychev, D.S. Kulkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 929(1). 01. 2018.