ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах

В.Л.Трушко✉, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Трушко В.Л., Розанов А.О., Саитгалеев М.М., Петров Д.Н., Ильинов М.Д., Карманский Д.А., Селихов А.А. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 848-858. EDN EGOJFL

Аннотация. С целью изучения механизма разрушения горных пород различного генезиса и формирования трещинных коллекторов на больших глубинах проведены лабораторные исследования образцов горных пород при нагружении в условиях всестороннего давления с регистрацией акустической эмиссии (АЭ) и параметров процесса изменения прочностно-деформационных свойств образцов. Исследованы пространственные распределения гипоцентров событий АЭ для каждого образца. По характеру распределений геометрия разрушения описана, затем визуально сопоставлена с положением сформированных макротрещин в образцах в результате испытаний. Рассчитаны временные тренды амплитудного распределения *b*, задаваемого законом Гуттенберга – Рихтера, которые сравнивались с кривыми нагружения и трендами рассчитанной активности АЭ. На основании анализа процесса АЭ для трех типов пород – магматических (уртиты), метаморфических (апатит-нефелиновые руды) и осадочных (известняки) – проведена параметризация акустической эмиссии для определения особенностей деформационного процесса и связанной с ним дилатансией. В результате выявлены три вида разрушений образцов, установлены их геометрия и изменения прочностных и сейсмических критериев.

***Ключевые слова*:** акустическая эмиссия; физико-механические свойства; *b*-фактор; критерии разрушения; дилатансия; распределение гипоцентров

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания FSRW-2024-0008 «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах».

Поступила: 09.09.2024 ***Принята: 05.11.2024*** ***Онлайн: 12.11.2024*** ***Опубликована: 12.11.2024***

Введение. Изучение процессов разрушения горных пород различного генезиса и механизма формирования трещинных коллекторов на больших глубинах [1-3] актуально для понимания формирования природных резервуаров и многоуровневых месторождений углеводородного сырья в экстремальных термобарических условиях [4, 5].

Разрушение горных пород и явление дилатансии изучается различными методами [6-10], которые выявили сложный процесс развития критических деформаций в дефектных структурах [11-14], включающий пластическую стадию и хрупкое разрушение. Моделирование в лабораторных условиях нарушенности каменной соли и кембрийской глины при нагружении образцов до перехода в запредельную часть диаграммы «напряжение – деформация» и последующие испытания нарушенных и ненарушенных образцов на ползучесть показали существенное снижение деформаций ползучести у нарушенных пород и уменьшение их вклада в дальнейший процесс разрушения [15-17].

В консолидированных породах свойство дилатансии проявляется посредством образования зоны микротрещиноватости, которая включает зону подготовки разрушения и характеризуется интенсивным взаимодействием микротрещин отрыва, определяемых размерами минеральных зерен, в результате которого формируется макроразрыв [18, 19]. Исследования [20-22] процесса

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

разрушения магматических (граниты) и осадочных (песчаники) пород с регистрацией АЭ дают общее представление о развитии трещинообразования в породах под нагрузкой [23-25].

Вначале образуются микротрещины отрыва без значительного взаимодействия друг с другом, характеризуемые пространственным распределением, не связанным с траекторией и расположением будущего макроразрыва. По мере приближения нагрузки к пределу прочности начинается образование зародыша будущего макроразрыва, когда несколько микротрещин отрыва взаимодействуют и усиливают раскрытие друг друга. Они образуют зону процесса разрушения – область близко расположенных друг к другу микротрещин. В критически нагруженной породе поле напряжений, созданное силами растяжения в микротрещинах, провоцирует взаимодействие трещин и вызывает нестабильное распространение этих трещин в неповрежденную область породы. По мере увеличения размера зоны разрушения ее центральная часть ослабляется сдвиговыми деформациями, и в результате возникает неустойчивость, которая распространяется по следу развивающейся зоны разрушения. Поля напряжений, относящиеся к сдвигу вдоль разрыва, усиливают раскрытие микротрещин в зоне разрушения, тем самым переводя процесс в лавинообразное формирование микротрещин и переход к макроразрушению.

Таким образом, общим для модели хрупкого разрушения консолидированных пород является то, что формирование макроразрыва происходит в результате близкого взаимодействия нескольких микротрещин при достижении критической плотности. При этом разрыв распространяется в плоскости, составляющей угол $\beta = 20\text{-}30°$ к оси максимального напряжения сжатия σ_1 [20] в соответствии с аналитически описанными полями напряжений расширяющихся микротрещин [26].

Прорастание расширяющихся микротрещин в хрупких породах, которые подвергаются всестороннему сжатию, вызвано действием неоднородного напряжения, зависящего от структурных особенностей породы. К таким структурным особенностям относятся размеры минеральных зерен, несовершенные контакты границ зерен, различие модулей упругости составных минералов, внутрикристаллические дефекты, а также деформации сдвига вдоль границ зерен. В работе [27] рассмотрено распределение микротрещин при физическом и численном моделировании в граните, где в результате разрушения выявлены массив сообщающихся микротрещин и множество изолированных. На основании идентичности образа данного распределения рассчитанным геометриям гипоцентров событий АЭ для магматических пород формулируется определение зоны микротрещиноватости. Зона микротрещиноватости соответствует объему массива сообщающихся (предположительно) трещин, который характеризуется плотностью событий АЭ не менее 0,0125 событий/мм^3 согласно применяемому в работе методу расчета.

Целью данной работы является параметризация разрушения по четырем критериям – геометрии разрушения, пределу прочности, амплитудному распределению и активности АЭ. Параметризация проводилась по результатам анализа лабораторных испытаний разрушения двух образцов магматических (уртиты), двух метаморфических (апатит-нефелиновые руды) и двух осадочных пород (известняки).

Методы. Для лабораторных исследований деформационного процесса выбраны магматические горные породы: крупнозернистые массивные уртиты с размером зерна 5-10 мм (Хибинское месторождение), метаморфические горные породы, представленные апатит-нефелиновыми рудами бедной и богатой зон, сложенными мелкозернистым агрегатом сахаровидного апатита размером 2-1 мм (Хибинское месторождение) [28], и осадочные горные породы – скрыто-тонкозернистые серые известняки (керновый материал скважины 3-Нерутынская) (табл.1).

Таблица 1

Структура горных пород

Происхождение	Образец	Горная порода	Структура
Магматическая	N1’	Массивный уртит	Крупнозернистая (размер зерна 5-10 мм)
	N8	Массивный уртит	Крупнозернистая (размер зерна 5-10 мм)
Метаморфическая	N1	Апатит-нефелиновая руда бедной зоны	Мелкозернистая (размер зерна 2-1 мм)
	N2	Апатит-нефелиновая руда богатой зоны	Мелкозернистая (размер зерна 2-1 мм)
Осадочная	DP 22-2	Известняк серый	Тонко-скрытозернистая
	DP 21-2		

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

Исследования поведения образцов горных пород в условиях объемного напряженного состояния проводились на сервогидравлической прессовой установке MTS 815 с интегрированной в нее системой акустической эмиссии Milne DAQ (An Itasca International Company, UK). Технические характеристики установки MTS 815 позволяют создавать боковое и поровое давление в диапазоне от 0 до 80 МПа и осевую нагрузку на образец до 4600 кН. Данная система может моделировать напряженное состояние массива горных пород до глубин 5-6 км. Конструктивно установка MTS 815 включает в себя силовую раму, камеру трехосного сжатия, усилители бокового и порового давлений, контроллеры и пакет программного обеспечения для автоматического управления режимом нагружения, сбора и обработки информации с датчика силы и датчиков продольной и поперечной деформации.

Регистрация сигналов АЭ производилась системой сбора данных Milne DAQ в триггерном режиме. Основные параметры запуска и регистрации контролировались с помощью программного модуля Milne Leach: частота оцифровки сигналов – 10 МГц; число отсчетов для каждого сигнала – 2048 samples; динамический диапазон – 5 В; порог запуска по каждому каналу – 80-100 мВ.

Процесс подготовки к испытаниям заключался в герметизации боковой и торцевых поверхностей образца при помощи резиновой оболочки. На боковой поверхности образца размещались датчики акустической эмиссии. Образец помещался в камеру трехосного сжатия, в которой минеральным маслом создавалось боковое давление σ_3, соответствующее моделируемым глубинам. Затем осуществлялось нагружение образца осевой нагрузкой σ_1. Нагружение выполнялось в режиме заданной скорости деформирования, равной 0,01 мм/мин. Постоянство скорости нагружения обеспечивалось системой автоматического управления прессом. В ходе эксперимента фиксировались показания датчика силы и датчиков продольной и поперечной деформации с частотой 1 Гц, по которым строились графики изменения продольных, радиальных и объемных деформаций от значения напряжения.

Предел прочности при объемном сжатии и заданном значении бокового давления для каждого образца вычисляется по формуле $\sigma_c^o = \sigma_c^д + \sigma_3$, где $\sigma_c^д$ – предел прочности при объемном сжатии без учета величины бокового давления σ_3.

В табл.2 приведены сведения о прочностных и деформационных свойствах исследуемых образцов горных пород.

Таблица 2

Физико-механические свойства горных пород

Тип породы	Плотность, кг/м^3	Прочность, МПа		Сцепление, МПа*	Угол внутреннего трения, град*	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
		При одноосном сжатии	При растяжении				
Магматические (уртиты)	2640	160,2	15,1	38,7	50,9	58,7	0,06
Метаморфические (богатые руды)	3170	63,6	8,15	17,0	51,5	37,3	0,14
Метаморфические (бедные руды)	2950	119,3	11,5	25,9	53,5	56,5	0,13
Осадочные (известняки)	2571	153,2	14,8	41,7	37,1	69,5	0,32

* Параметры определения по результатам испытаний при одноосном и объемном сжатии.

Расчет координат гипоцентров АЭ производился с помощью коммерческого программного обеспечения ASC InSite Seismic Processor (An Itasca International Company, UK). Скорости волн в алгоритме локации для уртитов задавались равными V_p = 4767 м/с, V_s = 3150 м/с, скорости для руд – V_p = 3517 м/с, V_s = 1691 м/с. Скорости волн измерялись ультразвуковым методом перед испытанием каждого образца. Для локации источников использовалось 12 датчиков АЭ с контактной площадкой диаметром 8 мм и диаметром пьезоэлемента 5 мм. Автоматическое определение времени первого вступления осуществлялось встроенной в InSite Seismic Processor функции RMS auto-picking.

Для пространственной параметризации деформационного процесса рассчитывалась плотность событий АЭ, по распределению которой в объеме образца оценивалось отношение максимальной ширины зоны микротрещиноватости к длине магистральной трещины, а также угол наклона β магистральной трещины в соответствии с моделью [20]. Плоскость сечения образца для анализа зоны микротрещиноватости выбиралась соответствующей максимальным значениям плотности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для параметризации деформационного процесса во времени использовались *b*-фактор и активность АЭ; *b*-фактор определялся как коэффициент в формуле амплитудного распределения Гуттенберга – Рихтера [29-31]. Данный параметр характеризует величину, обратную вероятности появления событий АЭ высоких амплитуд, т.е. значение *b* уменьшается при росте числа событий высоких амплитуд. Таким образом, *b*-фактор соответствует масштабу энергии, излучаемой в течение определенного интервала времени испытания. В данной работе анализ *b*-фактора проводился для интервала существенно неупругого поведения образцов вблизи предельных напряжений.

При параметризации активности АЭ применялся расчет аппроксимационной кривой в виде экспоненты для участка тренда активности, соответствующего стадии необратимых деформаций, по формуле

$$Y = C\exp(\alpha t),$$

где Y – приближенное значение активности АЭ; C – масштабирующий коэффициент; α – коэффициент показателя экспоненты; t – текущее время испытания.

Коэффициент показателя экспоненты α характеризует скорость возрастания активности АЭ – чем выше значение α, тем быстрее растет число событий в единицу времени в процессе акустической эмиссии.

В расчете *b*-фактора учитывался канал регистрации, соответствующий сигналу максимальной амплитуды для каждого события АЭ. Для построения трендов *b*-фактора и активности АЭ применялся метод скользящего временного окна переменной длительности, которое последовательно перемещалось вдоль временной оси каждого испытания. Длительность окна выбиралась такой, чтобы обеспечить достаточную разрешающую способность тренда и статистически значимые оценки *b*-фактора и активности АЭ. Расчет *b*-фактора и активности АЭ выполнен с помощью компьютерного приложения, разработанного авторами статьи.

Для иллюстрации энергии событий АЭ на распределениях гипоцентров АЭ отображались значения магнитуды, соответствующие цветовым диаграммам для каждого образца. Магнитуда определялась с помощью встроенной в InSite Seismic Processor функции для каждого локационного события как логарифм среднего по количеству датчиков произведения стандартного отклонения каждого сигнала события на расстояние между соответствующим датчиком и источником события.

Обсуждение результатов. Результаты анализа пространственного распределения гипоцентров АЭ для магматических и метаморфических пород представлены в виде сопоставления координат событий АЭ, распределений плотности событий и фотографий образцов после испытаний с видимой магистральной трещиной. На рис.1 показаны гипоцентры АЭ и распределения их плотностей в соответствии со шкалой магнитуд АЭ для образцов магматических пород (уртиты с пределом прочности 523 и 463 МПа). Видно, что в обоих образцах сформировались диагональные макроразрывы в результате заключительной стадии разрушения. Причем наиболее симметричная форма зоны микротрещиноватости наблюдается в образце с пределом прочности 463 МПа, которая согласуется с полученной для гранита в работе [27]. Углы наклона разрывов β для образцов равны 22,32 и 20,44°, что удовлетворяет диапазону, предсказанному в работе [20] для механизма хрупкого разрушения через дилатансионный процесс формирования массива эшелонированных микротрещин отрыва и сопутствующей деформации сдвига.

На рис.2 и 3 представлены результаты анализа пространственного распределения гипоцентров АЭ для образцов метаморфических пород – руды бедной зоны с пределом прочности 520 МПа (рис.2) и руды богатой зоны с пределом прочности 208 МПа (рис.3). Для образца руды бедной зоны свойственен диагональный тип макроразрыва с углом 21,23°, что соответствует диапазону хрупкого разрушения [20]. Но, в отличие от уртитов, наблюдается существенная пространственная локализация процесса через образование двух отчетливых кластеров (рис.2), в которых плотность событий АЭ повышается почти в два раза по сравнению с уртитами. При этом ширина зоны микротрещиноватости становится значительно меньше по сравнению с уртитами, что сказывается на уменьшении показателя соотношения ширины зоны к длине макроразрыва (от 0,329 в среднем для уртитов до 0,223 для руды бедной зоны). Это согласуется с обнаруженным в работе [32] уменьшением ширины зоны подготовки разрушения с уменьшением размера минеральных зерен породы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

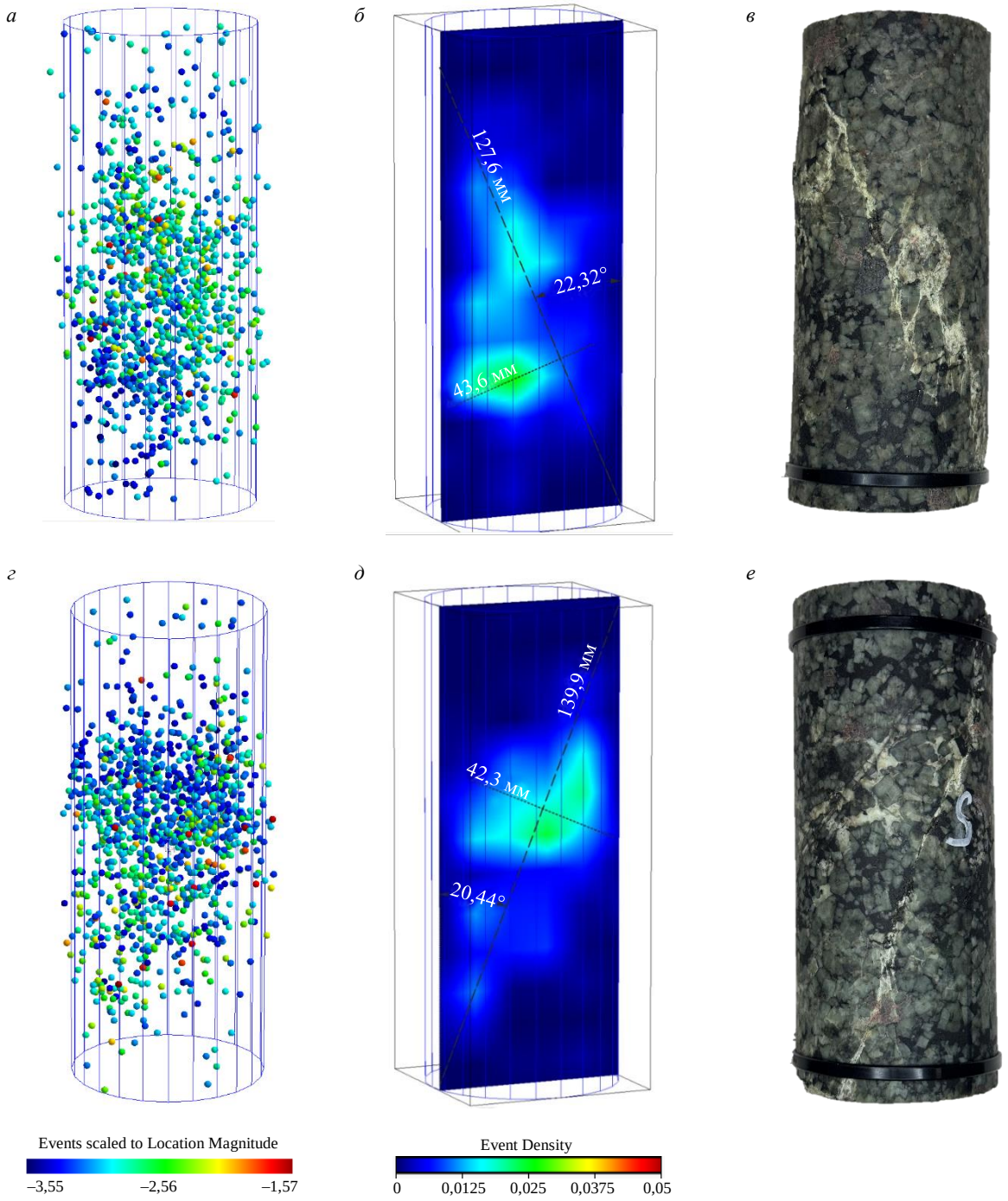


Рис.1. Анализ зоны микротрещиноватости для магматических пород (образец уртита с пределом прочности 523 МПа (*а-в*) и 463 МПа (*г-е*): *а*, *г* – распределение гипоцентров событий АЭ; *б*, *д* – плотность событий АЭ; *в*, *е* – образцы после испытаний с диагональной магистральной трещиной

Можно сделать следующий основной вывод относительно описанных образцов. В уртитах и бедных рудах доминирует хрупкий механизм разрушения, при этом в образце руды бедной зоны проявляется пространственная локализация и сужение зоны микротрещиноватости по сравнению с уртитами. В то же время *b*-фактор и коэффициент показателя экспоненты α активности АЭ (в дальнейшем exp-фактор) растут от уртитов к бедным рудам (табл.3). Данный факт свидетельствует об уменьшении размеров трещин в рудах по сравнению с уртитами и, как следствие, локализации процесса АЭ во времени и пространстве – увеличении скорости образования новых трещин за счет более тесного расположения. Вывод об уменьшении размеров трещин с увеличением *b*-фактора делается на основании теории, изложенной в работе [33].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

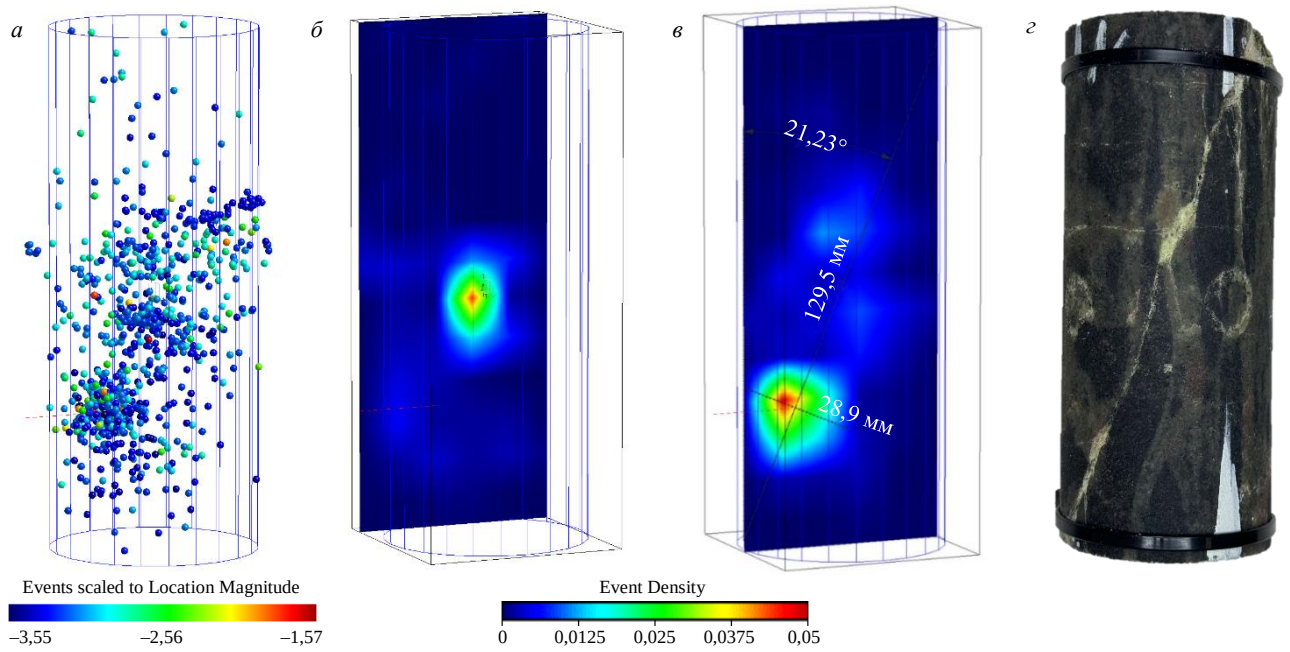


Рис.2. Анализ зоны микротрещиноватости для метаморфических пород (образец руды бедной зоны с пределом прочности 520 МПа): *а* – распределение гипоцентров событий АЭ; *б* – плотность событий АЭ для первого кластера; *в* – плотность событий АЭ для второго кластера; *г* – образец после испытаний с диагональной магистральной трещиной

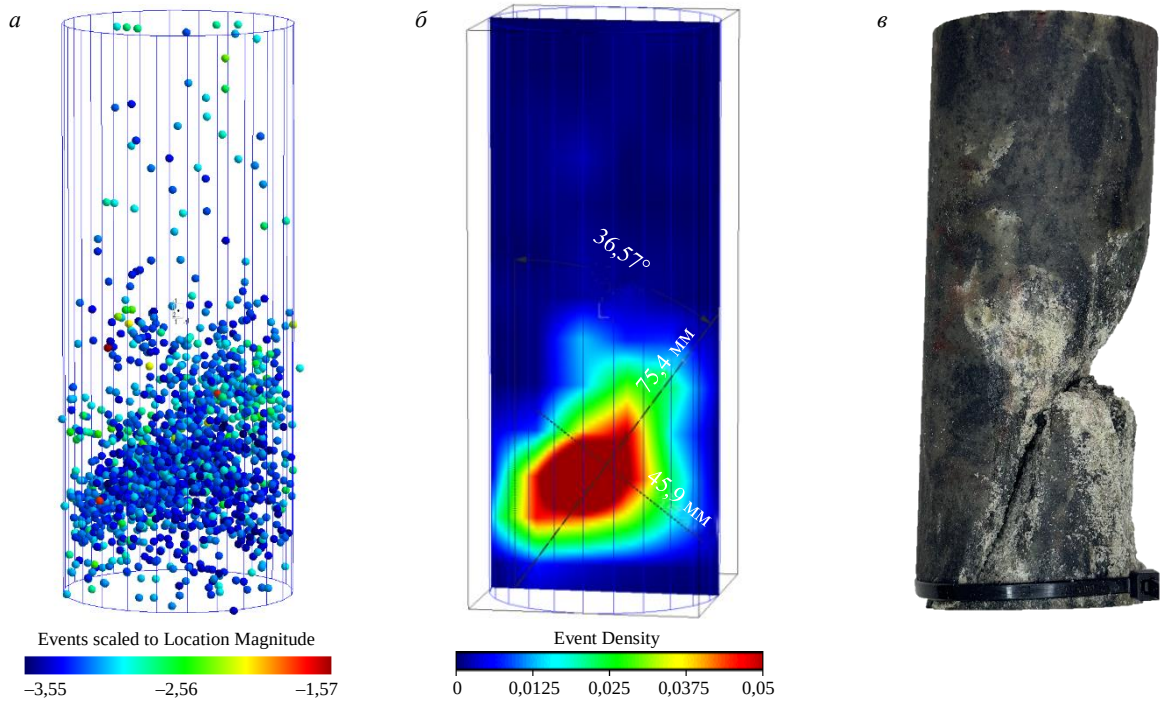


Рис.3. Анализ зоны микротрещиноватости для метаморфических пород (образец руды богатой зоны с пределом прочности 208 МПа): *а* – распределение гипоцентров событий АЭ; *б* – плотность событий АЭ; *в* – образец после испытаний с наклонной макротрещиной

Для образца руды богатой зоны (рис.3) наблюдается рост плотности событий до 0,1 событий/мм^3. Оценка зоны микротрещиноватости также говорит об ее увеличении (показатель отношения ширины зоны к длине макроразрыва равен 0,609). При этом угол β превышает диапазон предсказанных в работе [20] значений углов, удовлетворяющих хрупкому разрушению, и равен 36,57°, *b*-фактор характеризуется наибольшим для уртитов и руд значением 1,73, что свидетельствует об уменьшении энергии излучения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

Таблица 3

Параметры акустической эмиссии

Образец породы	Всестороннее давление σ_3, МПа	Поровое давление, МПа	Предел прочности, МПа	Максимальное значение *b*-фактора АЭ	Exp-фактор АЭ	Максимальная плотность событий АЭ, событий/мм^3	Соотношение размеров зоны микро-трещиноватости	Угол наклона магистральной трещины β, град
Массивные уртиты, крупнозернистые, N8	40	–	523	0,64	0,0014	0,025	0,342	22,32
Массивные уртиты, крупнозернистые, N1'	40	–	463	0,76	0,0015	0,025	0,316	20,44
Руды бедной зоны, мелкозернистые, N1	40	–	520	1,25	0,0027	0,05	0,223	21,23
Руды богатой зоны, мелкозернистые, N2	40	–	208	1,73	0,0032	0,1	0,609	36,57
Известняк, скрыто-тонко-зернистый, DP22-2	50	30	329	2,09	–	–	–	0
Известняк, скрыто-тонко-зернистый, DP21-2	75	30	304	1,73	–	–	–	0

На рис.4 представлены результаты анализа *b*-фактора и активности АЭ для магматических и метаморфических пород в виде графиков изменения параметров в течение испытаний, сопоставленных с кривыми нагружения. Видно, что для магматических пород (уртиты) аппроксимационные кривые (черные линии) более пологие по сравнению с метаморфическими (руды). Это свидетельствует о постепенном образовании микротрещин в уртитах и об ускоренном – в рудах, что сказывается на увеличении exp-фактора.

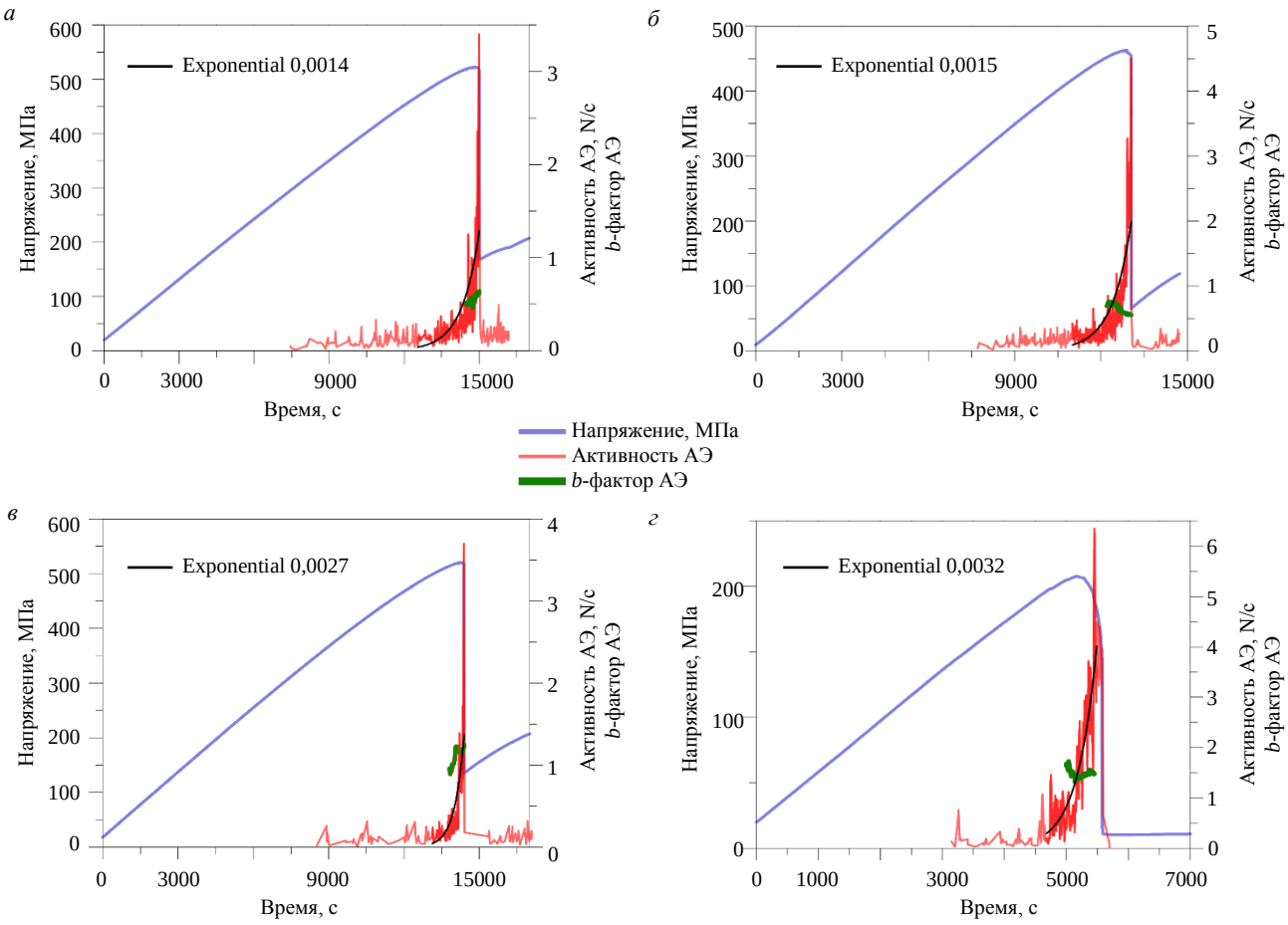


Рис.4. Анализ активности АЭ и *b*-фактора для магматических (уртиты) и метаморфических (руды) пород:
а – образец уртита с пределом прочности 523 МПа; *б* – образец уртита с пределом прочности 463 МПа;
в – образец руды бедной зоны с пределом прочности 520 МПа;
г – образец руды богатой зоны с пределом прочности 208 МПа

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 848-858

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

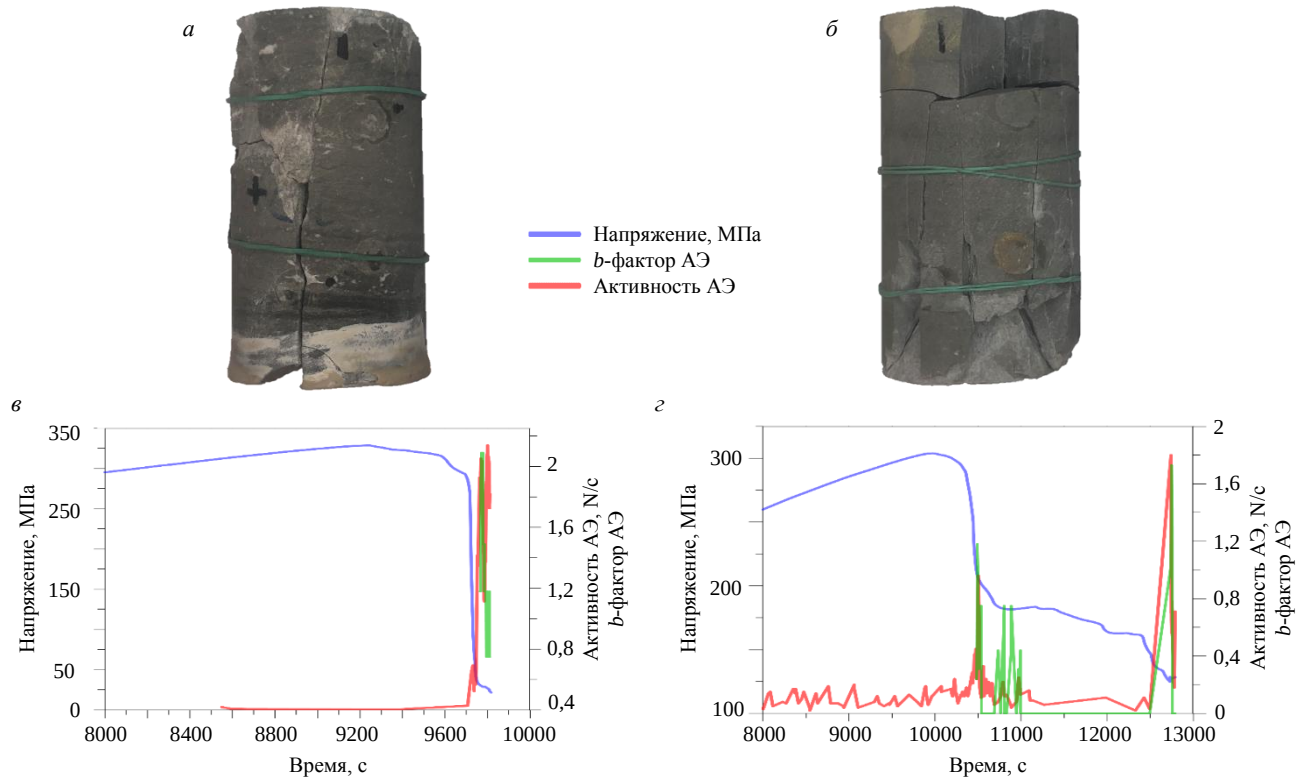


Рис.5. Анализ активности АЭ и *b*-фактора для осадочных пород:
а – образец известняка с пределом прочности 329 МПа после испытаний (видна магистральная вертикальная трещина);
б – образец известняка с пределом прочности 304 МПа после испытаний (видны три магистральные вертикальные трещины);
в – заключительная стадия разрушения известняка с пределом прочности 329 МПа;
г – заключительная стадия разрушения известняка с пределом прочности 304 МПа

На рис.5 представлены результаты анализа *b*-фактора и активности АЭ для осадочных пород (известняки) в виде графиков изменения данных параметров в течение испытаний, сопоставленных с кривыми нагружения. Также показаны фотографии образцов после испытаний, на которых отчетливо видны вертикальные магистральные трещины. Таким образом, геометрия разрушения существенно отличается от магматических и метаморфических пород. По трендам активности можно видеть, что в процессе АЭ отсутствуют предвестники разрушения, что говорит об отсутствии образования зоны микротрещиноватости и, как следствие, дилатансии, *b*-фактор имеет максимальное значение среди всех рассмотренных образцов (2,09). Все это говорит о предельной локализации процесса разрушения.

Пространственные и временные параметры АЭ, контролирующие деформационный процесс в породах различного генезиса, сведены в табл.3.

На рис.6 представлены усредненные данные независимых исследований деформационного процесса для четырех групп пород, соответствующих испытанным образцам с регистрацией АЭ. Показаны только нелинейные участки нагружения, соответствующие разуплотнению. Образцы осадочных и метаморфических (бедные руды) пород проявляют эффект разуплотнения при соотношении $\sigma^{д}/\sigma_{c}^{д}$, равном 0,53, магматических и метаморфических (богатые

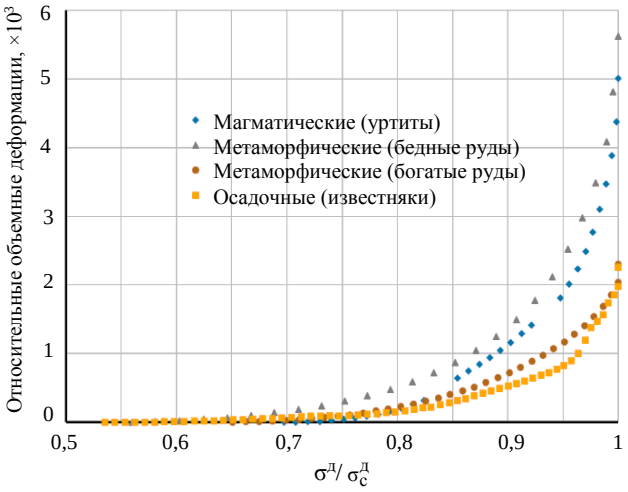


Рис.6. Графики зависимостей относительных объемных деформаций от соотношения действующих дифференциальных напряжений к пределу прочности для исследуемых четырех групп пород

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, М.Д.Ильинов, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2024

руды) пород при соотношениях 0,70 и 0,65, соответственно. Видно, что для магматических (уртиты) и метаморфических (бедные руды) пород объемные деформации значительно больше, чем для богатых руд и осадочных (известняки) пород. Данный результат хорошо согласуется с полученными параметрами АЭ. Дилатансия сопровождается ростом объемной деформации при хрупком механизме разрушения. Анализ пространственных и временных параметров АЭ (табл.3) показал, что образцы магматических пород и руды бедной зоны (метаморфические породы) удовлетворяют критериям хрупкого разрушения. При этом показатель величины зоны микротрещиноватости больше для магматических пород (0,342 и 0,316), чем для метаморфических (0,223). Это говорит о том, что зона микротрещиноватости для руды бедной зоны более локализована. Таким образом, можно сделать качественный вывод, что обоим типам пород присуще явление дилатансии.

В руде богатой зоны при максимальном показателе ширины зоны микротрещиноватости (0,609) и максимальной плотности событий (0,1 событий/мм^3) угол β стремится к 45° и равен 36,57°, превышает диапазон для хрупкого разрушения [20], *b*-фактор приобретает максимальное значение (1,73) из полученных для магматических (уртиты) и метаморфических (руды) пород. При этом объемная деформация для богатой руды (рис.6) характеризуется более чем в два раза меньшим значением по сравнению с уртитами и бедной рудой. Отсюда сделано предположение, что в образце богатой руды образуется множество низкоэнергетических трещин, характеризующихся отсутствием раскрытия, что свидетельствует о преобладании пластической деформации и, как следствие, уменьшении дилатансии. Результирующая магистральная трещина развивается в виде площадки скольжения.

Повышение *b*-фактора с увеличением роли пластической деформации было отмечено в работах [29, 34], где исследовались параметры АЭ для горных пород различного генезиса. При сравнении результатов одноосного нагружения образцов для гранита Westerly максимальное значение *b*-фактора получилось равным 1,68, для мрамора – 2,50.

Для осадочных пород (известняки) наблюдается обратное изменение угла β по сравнению с богатыми рудами – угол стремится к нулю. Совместное рассмотрение данного факта с максимальным значением *b*-фактора (2,09) приводит к заключению о предельной локализации процесса трещинообразования, т.е. о минимальной зоне трещиноватости. Это в свою очередь свидетельствует об отсутствии дилатансии, что подтверждается минимальной объемной деформацией (рис.6). Механизм образования результирующих магистральных трещин аналогичен трещине Гриффитса [35], развивающейся в поле растягивающих напряжений в изотропном и однородном материале.

Заключение. Результаты выполненного комплекса лабораторных исследований механизма разрушения и процесса акустической эмиссии в горных породах разного генезиса при напряженном состоянии, соответствующем глубинам залегания до 5 км, позволяют заключить:

• В горных породах разного генезиса выявлены три вида макро-разрушения: хрупкое разрушение с формированием массива эшелонированных трещин (в уртитах и бедных рудах); хрупкое разрушение с формированием одиночных вертикальных трещин типа Гриффитса (в известняках); пластическое деформирование и разрушение (в богатых рудах).

• В магматических (массивный уртит) и метаморфических (апатит-нефелиновая руда) породах явление дилатансии наблюдается с образованием сети сообщающихся трещин отрыва, что предопределяет возможность формирования трещинных коллекторов в массиве пород на больших глубинах. В большей степени дилатансия проявляется в массивных уртитах и формирует развитую зону микротрещиноватости. В апатит-нефелиновых рудах наблюдается локализация процесса микротрещинообразования как пространственная, так и временная.

• В известняках наблюдается предельный случай локализации процесса микротрещинообразования, и дилатансия в них близка к нулю. Это соответствует модели, предложенной Z.Reches и D.Lochner, о зарождении и росте разломов в хрупких горных породах, показывающей, что при стремлении к нулю (локализация процесса) отношения расстояния между трещинами к размеру трещин, угол наклона β также стремится к нулю. Это подтверждается испытанием образцов известняка с поровым давлением, где отсутствовала фильтрация, которая проявилась только на заключительной стадии макроразрыва при образовании одиночных вертикальных трещин.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• С позиции параметризации акустической эмиссии необходимо дополнять исследования *b*-фактора анализом функции источника АС для каждого события, характеризующего кинематику прорастания единичной трещины, что даст возможность определить масштаб зоны микротрещиноватости в различных породах, а также критерий перехода с одного уровня разрушения на другой.

• Результаты петрографического анализа образцов пород до и после испытания могут являться фактором, подтверждающим предположение о том, что по повышенным значениям *b*-фактора можно судить об уменьшении размеров образующихся трещин в породах разного генезиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V. et al*. Chapter 1. Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions / Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. Academic Press, 1992. P. 3-31. DOI: 10.1016/S0074-6142(08)62813-2

2. Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // Nature. 1991. Vol. 350. № 6313. P. 39-42. DOI: 10.1038/350039a0

3. *Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D.* A two-stage model of fracture of rocks // Pure and Applied Geophysics. 1996. Vol. 146. № 2. P. 253-263. DOI: 10.1007/BF00876492

4. *Prischepa O.M., Kireev S.B., Nefedov Yu.V. et al.* Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation // Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. № 1192051. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051

5. *Egorov A.S., Prischepa O.M., Nefedov Y.V. et al*. Deep Structure, Tectonics and Petroleum Potential of the Western Sector of the Russian Arctic // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 3. № 258. DOI: 10.3390/jmse9030258

6. *Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А*. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150

7. *Коршунов В.А., Павлович А.А., Бажуков А.А.* Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 606-618. DOI: 10.31897/PMI.2023.16

8. *Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G*. Experimental and numerical research of the jointed rock mass anisotropy in three-dimensional stress field // The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2022. Vol. 37. № 2. P. 109-122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10

9. *Xiao-Ping Zhang, Louis Ngai Yuen Wong.* Cracking Processes in Rock-Like Material Containing a Single Flaw Under Uniaxial Compression: A Numerical Study Based on Parallel Bonded-Particle Model Approach // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. Vol. 45. Iss. 5. P. 711-737. DOI: 10.1007/s00603-011-0176-z

10. *Xiao-Ping Zhang, Louis Ngai Yuen Wong.* Crack Initiation, Propagation and Coalescence in Rock-Like Material Containing Two Flaws: a Numerical Study Based on Bonded-Particle Model Approach // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013. Vol. 46. Iss. 5. P. 1001-1021. DOI: 10.1007/s00603-011-0176-z

11. *Ильинов М.Д., Карташов Ю.М., Карманский А.Т., Козлов В.А.* Влияние нарушенности горных пород на их реологические свойства // Записки Горного института. 2010. Т. 185. С. 31-36.

12. *Ильинов М.Д., Карташов Ю.М.* Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. 2011. Т. 190. С. 207-209.

13. *Davis R.O., Selvadurai A.P.S.* Plasticity and Geomechanics. Cambridge University Press, 2002. 300 p. DOI: 10.1017/CBO9780511614958

14. *Куксенко В.С., Махмудов Х.В., Мансуров В.А. и др.* Структурные изменения при деформации природных гетерогенных материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 4. С. 55-59.

15. *Трушко В.Л., Протосеня А.Г.* Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162-166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162

16. *Грищенко А.И., Семенов А.С., Мельников Б.Е.* Моделирование процессов деформирования и разрушения керна при его извлечении с больших глубин // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 243-252. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.8

17. *Рассказов И.Ю., Цирель С.В., Розанов А.О. и др.* Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 29-37.

18. *Jie Li, Mingyang Wang, Kaiwen Xia et al.* Time-dependent dilatancy for brittle rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 1054-1070. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.08.002

19. *LianYing Zhang, XianBiao Mao, AiHong Lu.* Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature // Science in China Series E: Technological Sciences. 2009. Vol. 52. Iss. 3. P. 641-646. DOI: 10.1007/s11431-009-0063-y

20. *Reches Z., Lockner D.A.* Nucleation and growth of faults in brittle rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1994. Vol. 99. Iss. B9. P. 18159-18173. DOI: 10.1029/94JB00115

21. *Zang A., Wagner C., Stanchits S. et al.* Fracture process zone in granite // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2000. Vol. 105. Iss. B10. P. 23651-23661. DOI: 10.1029/2000JB900239

22. *Zang A., Wagner C.F., Dresen G.* Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1996. Vol. 101. Iss. B8. P. 17507-17521. DOI: 10.1029/96jb01189

23. *Baud P., Klein E., Wong T.-f.* Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity // Journal of Structural Geology. 2004. Vol. 26. Iss. 4. P. 603-624. DOI: 10.1016/j.jsg.2003.09.002

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

24. *S.-H. Chang, C.-I. Lee.* Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004. Vol. 41. Iss. 7. P. 1069-1086. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.04.006

25. *Карманский А.Т.* Коллекторские свойства горных пород при изменении вида напряженного состояния // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 289-292.

26. *Pollard D.D., Segall P.* 8 – Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces / Fracture Mechanics of Rock. Academic Press, 1987. P. 277-349. DOI: 10.1016/B978-0-12-066266-1.50013-2

27. *Hofmann H., Babadagli T., Jeoung Seok Yoon et al.* A grain based modeling study of mineralogical factors affecting strength, elastic behavior and micro fracture development during compression tests in granites // Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 147. P. 261-275. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.09.008

28. *Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.* Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. 359 с.

29. *Scholz C.H.* The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. Vol. 58. № 1. P. 399-415. DOI: 10.1785/BSSA0580010399

30. *Wyss M.* Towards a Physical Understanding of the Earthquake Frequency Distribution // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1973. Vol. 31. Iss. 4. P. 341-359. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x

31. *Zuhair Hasan El-Isa.* Frequency-Magnitude Distribution of Earthquakes / Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. IntechOpen, 2018. P. 87-107. DOI: 10.5772/intechopen.77294

32. *Zang A., Stanchits S., Dresen G.* Acoustic Emission Controlled Triaxial Rock Fracture and Friction Tests / Proceedings of the International Conference on Structural Integrity and Fracture, 25-27 September 2002, Perth, Australia. A.A. Balkema Publishers, 2002. P. 289-296.

33. *Malén K., Bolín L.* A Theoretical Estimate of Acoustic-Emission Stress Amplitudes // Physica Status Solidi (B). 1974. Vol. 61. № 2. P. 637-645. DOI: 10.1515/9783112502020-030

34. *Scholz C.H.* Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression // Journal of Geophysical Research. 1968. Vol. 73. Iss. 4. P. 1417-1432. DOI: 10.1029/JB073i004p01417

35. *Griffith A.A.* The Phenomena of Rupture and Flow in Solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. 1921. Vol. 221. Iss. 582-593. P. 163-198. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006

***Авторы*: В.Л.Трушко,** *д-р техн. наук, директор Института специальных научных проектов, Trushko_VL@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-9742-1076* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **А.О.Розанов,** *старший научный сотрудник, https://orcid.org/0009-0006-4615-0401* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **М.М.Саитгалеев,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-9859-5799* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Д.Н.Петров,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0002-5513-1871* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **М.Д.Ильинов,** *канд. техн. наук, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0009-0007-2185-8638* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Д.А.Карманский,** *ведущий инженер, https://orcid.org/0000-0002-3214-5322* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **А.А.Селихов,** *аспирант, https://orcid.org/0009-0005-8163-2249* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0