ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Механизм формирования зон микротрещиноватости в образцах пород различных литологических типов при разрушении в условиях объемного напряженного состояния

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

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Трушко В.Л., Ильинов М.Д., Розанов А.О., Саитгалеев М.М., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А. Механизм формирования зон микротрещиноватости в образцах пород различных литологических типов при разрушении в условиях объемного напряженного состояния // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 136-145. EDN IJLCCV

Аннотация

Изучение механики разрушения гетерогенных пород, зарождения и развития трещин имеет практическое применение для геоконтроля и выявления зоны трещиноватости при скважинной добыче углеводородов. Рассмотрены особенности формирования зоны микротрещиноватости в зависимости от типа неоднородностей горной породы при разрушении образцов в условиях объемного напряженного состояния. Исследования проводились на сервогидравлической прессовой установке MTS 815 с интегрированной в нее системой акустической эмиссии Milne DAQ (Itasca International Company, UK). Представлены результаты разрушения образцов различных литологических типов, изготовленных из кернов постмагматических пород. Испытаны мелкозернистые образцы гнейсовой и полосчатой текстуры и крупнозернистый образец массивной текстуры. В процессе испытаний производилась регистрация акустической эмиссии (АЭ) с помощью 12 пьезокерамических датчиков. Для описания геометрии зоны трещиноватости рассчитывались координаты гипоцентров событий АЭ, затем проводился анализ конфигурации распределения гипоцентров с помощью процедуры томографии (послойное построение карт плотности событий АЭ) и определялись углы β между направлением макроразрыва и осевым напряжением σ_1. С целью интерпретации эволюции разрушения рассчитывались тренды *b*-фактора и активности АЭ, интервалы критического поведения которых сопоставлялись с данными локации и томографии. После испытаний образцов выявлены виды их деформирования и механизм разрушения с явлением дилатансии. Установлено, что для рассмотренных типов неоднородностей образцов формируются различные структуры микротрещиноватости при одинаковых условиях объемного нагружения. В мелкозернистой породе гнейсовой текстуры образуется линейное распределение гипоцентров АЭ, указывающее на формирование микротрещиноватости вдоль направления слоистости. Для мелкозернистой породы полосчатой текстуры характерно распределение гипоцентров с образованием ярко выраженных кластеров, отражающих области наиболее интенсивного разрушения. В образце крупнозернистой массивной текстуры наблюдается объемное распределение гипоцентров с проявлением свойства дилатансии и образования обширной сети микротрещин.

Ключевые слова

объемное сжатие; дилатансия; микротрещиноватость; акустическая эмиссия; механизм разрушения; *b*-фактор

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания FSRW-2024-0008.

Поступила: 15.09.2025 ***Принята: 24.12.2025*** ***Онлайн: 11.02.2026*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Введение

Развитие механики разрушения и выявлений открытой трещиноватости в горных породах различного литологического типа и строения на основе лабораторных методов определения параметров систем трещин, влияющих на производительность коллекторов нефтегазовых, а также геотермальных месторождений, является актуальным направлением, имеющим практическую значимость для повышения эффективности скважинной добычи углеводородов [1, 2]. Наряду с определением физико-механических свойств горных пород, необходимо проводить исследования структурно-текстурных особенностей массива горных пород и их влияния на флюидонасыщенность в районах заложения скважин. Для повышения эффективности нефтяных и газовых скважин при добыче

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

углеводородов осуществляется комплексная оценка свойств пласта, включающая определение естественной трещиноватости пласта, тектонических нарушений, также проводятся керновые исследования [3, 4]. В работах [5, 6] отмечается, что основными индикаторами флюидонасыщенности коллекторов являются карстообразование, зоны трещин и разрывных нарушений. Проницаемость коллекторов именно трещинного типа наибольшим образом зависит от ориентации систем трещин и нарушений относительно главных напряжений [7]. Для уточнения коллекторских свойств месторождения проводится анализ структуры распределения литотипов по объему залежи [8].

При глубинном бурении [9, 10] необходимо учитывать не только эффект повышения прочности горных пород за счет увеличения всестороннего давления, но и ориентацию неоднородностей по отношению к максимальному главному напряжению. В работах [11-13] показано, что неоднородное строение горного массива оказывает значительное влияние на его механические характеристики, в частности, на предел прочности. Моделированием процесса установлено, что при виртуальном сжатии максимальное отклонение значений прочности от среднего достигает 60 % при изменении угла наклона системы неоднородностей в виде трещин относительно горизонтальной плоскости от 0 до 75°.

Экспериментальное изучение физико-механических свойств горных пород и степени их нарушенности осуществляется методами лабораторных испытаний с использованием экстензометров и сервоуправляемых испытательных прессов [14-16]. Для изучения влияния гетерогенной структуры пород на прочностные характеристики развиваются методы численного моделирования, построенные на дискретных элементах-зернах (GBM) [17, 18]. Среди лабораторных методов все большую актуальность приобретает метод акустической эмиссии (АЭ) [19-21], используемый для изучения формирования и развития дефектной структуры в реальном времени, а также влияния неоднородностей на локализацию деформации при механической нагрузке.

Разрушению твердых тел сопутствует формирование акустического поля, вызванного излучением упругих волн при образовании трещин [22-24]. Информативность акустического поля при исследовании процесса разрушения предполагает наличие однозначных связей между характеристиками источника излучения (прорастающей трещины), свойствами объекта исследования (горной породы) и параметрами АЭ [25-27]. Так как акустическая эмиссия возникает при разрыве связей в вершине трещины, сопровождающимся мгновенным высвобождением потенциальной энергии деформации в момент преодоления локального предела прочности материала, энергия излучения зависит от размера трещины и величины локального напряжения [28]. От момента начала трещинообразования до формирования макроразрыва масштаб процесса меняется от разрушения минеральных зерен породы до объединения микротрещин в магистральный разрыв. Образование зоны микротрещин при хрупком разрушении вызывает процесс дилатансии [29-31].

Методы исследования

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 (Itasca International Company, UK). Технические характеристики установки MTS 815 позволяют создавать боковое давление до 80 МПа и осевую нагрузку на образец до 4600 кН. 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 деформации. Образцы испытывались при всестороннем давлении 40 МПа.

Рассмотрены примеры разрушения трех образцов различных литологических типов, изготовленных из кернов постмагматических пород. На рис.1 представлены фотографии образцов до испытаний: два мелкозернистых образца гнейсовой (А) и полосчатой (Б) текстуры и крупнозернистый образец массивной текстуры (В). Гнейсовидная текстура образца А ориентирована под углом 50-60° к оси керна. Полосчатая текстура образца Б выражена расположением неоднородностей соосно с наибольшим главным напряжением (под углом 0-5° к оси образца).

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; полосно-пропускающий фильтр при обработке сигналов – 100-1200 кГц; динамический диапазон – 5 В; порог запуска по каждому каналу – 80-100 мВ.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 136-145
© В.Л.Трушко, М.Д.Ильинов, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2026

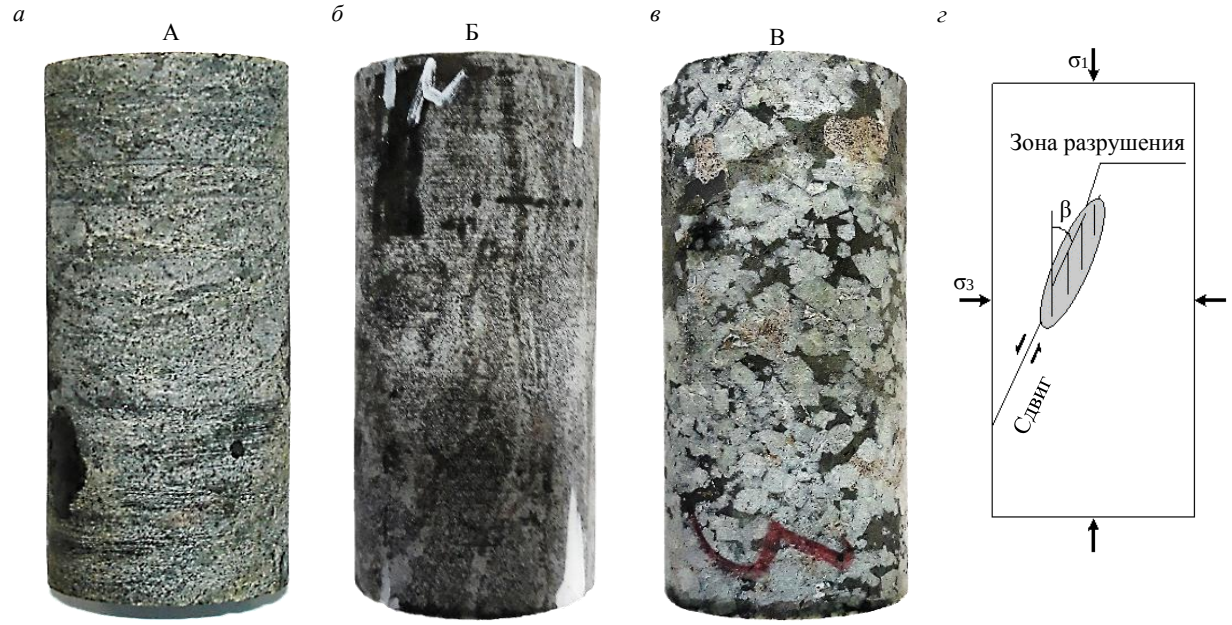


Рис.1. Образцы до испытаний: *а* – мелкозернистая гнейсовая текстура А; *б* – мелкозернистая полосчатая текстура Б; *в* – крупнозернистая массивная текстура В; *г* – схема нагружения и разрушения образца горной породы

Образцы изготавливались в виде цилиндров высотой 125 мм и диаметром 50 мм. Производилась герметизация боковой и торцевых поверхностей образца при помощи резиновой оболочки. На боковую поверхность образца устанавливалось 12 датчиков акустической эмиссии. Затем образец помещался в камеру трехосного сжатия, в которой минеральным маслом создавалось боковое давление σ_3, равное 40 МПа. После чего осуществлялось нагружение образца осевой нагрузкой σ_1 со скоростью 0,01 мм/мин.

Расчет координат гипоцентров АЭ и построение карт плотности событий производились с помощью программного обеспечения ASC InSite Seismic Processor (Itasca International Company. 2019, v 3.15, UK). Скорости волн, используемые в расчете координат, измерялись ультразвуковым методом перед испытанием каждого образца. В результате для образцов А и Б скорости волн задавались в расчете равными V_p = 3517 м/с и V_s = 1691 м/с, а для образца В – V_p = 4767 м/с и V_s = 3150 м/с. Для определения времен прихода *P*-волны по каждому каналу события АЭ использовалась функция автоматического определения времени первого вступления сигнала, встроенная в InSite Seismic Processor.

На рис.1, *г* показана общая схема, иллюстрирующая процесс разрушения консолидированных пород в условиях всестороннего давления [32]. Данная модель разработана авторами на основе анализа данных локации событий АЭ в образцах гранита Westerly и аналитически описанных полей напряжения расширяющихся микротрещин [33]. Согласно модели, зарождение макроразрыва начинается с образования зоны подготовки разрушения в результате нестабильного взаимодействия микротрещин отрыва в области их критической концентрации. Поля напряжений, относящиеся к сдвигу вдоль разрыва, усиливают раскрытие микротрещин в зоне подготовки разрушения, тем самым переводя процесс образования новых микротрещин в нестабильный и осуществляя переход к макроразрушению. При этом разрыв распространяется в плоскости, составляющей угол β = 20-30° к оси максимального напряжения сжатия σ_1.

Для определения геометрии зоны трещиноватости проводился анализ конфигурации распределения гипоцентров событий АЭ. Рассчитывались карты плотности событий АЭ, по форме которых описывалась структура разрушения и оценивался угол β между направлением макроразрыва и осевым напряжением σ_1 (рис.1, *г*). Для уточнения характера разрушения проводилось сопоставление результатов локации с геометрией разрушения, которая выявлялась визуально по преобладающему направлению макроскопических трещин на поверхности испытанных образцов.

Для иллюстрации энергии событий АЭ на распределениях их гипоцентров цветом отображались значения магнитуды M_L, соответствующие цветовым диаграммам. Магнитуда определялась

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

с помощью функции, встроенной в программу InSite Seismic Processor, для каждого локационного события как логарифм среднего по количеству датчиков произведения стандартного отклонения каждого сигнала события на расстояние между соответствующим датчиком и источником события:

$$M_L = \log\left(\frac{\sum_{m=1}^{n}\left(W_m^{RMS} d_m\right)}{n}\right),$$

где n – количество датчиков АЭ; d_m – расстояние между датчиком m и источником; W_m^{RMS} – стандартное отклонение сигнала по каналу m.

При интерпретации эволюции разрушения использовались b-фактор и активность АЭ. В соответствии с законом Гуттенберга – Рихтера [34] b-фактор определялся следующим образом:

$$b = \lg\frac{N_{AE}^1}{N_{AE}^2} \Big/ \lg\frac{A_2}{A_1},$$

где N_{AE}^1 – количество событий АЭ с амплитудой больше A_1; N_{AE}^2 – количество событий АЭ с амплитудой больше $A_2\,(A_2 > A_1)$.

С амплитудами A_1 и A_2 сравнивались значения сигналов, максимальные из всех зарегистрированных сигналов для каждого события АЭ. Изменение b-фактора происходит таким образом, что рост числа событий высоких амплитуд вызывает понижение значений b для заданных временных интервалов определенного испытания. Таким образом, b-фактор приобретает смысл вероятности наступления критического состояния горной породы – чем ниже значение b, тем вероятней состояние, близкое к хрупкому разрушению.

При построении 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 в то же время статистически значимые оценки b-фактора и активности АЭ. Расчет b-фактора и активности АЭ выполнен с помощью компьютерного приложения, разработанного авторами.

Результаты

С целью анализа структуры зоны образовавшихся микротрещин в процессе нагружения для всех образцов выполнялась томография, которая заключается в послойном построении карт плотности событий. Разрешение карт плотности, толщина и ориентация слоев задавались таким образом, чтобы выявить наиболее характерные особенности структуры микротрещиноватости для каждого образца.

Расчет плотности событий образца А осуществлялся для слоев толщиной 2,5 мм с разрешением 33×83. На рис.2 представлены локации гипоцентров событий АЭ, карта плотности событий и фотография после испытаний для данного образца. Видно, что основное скопление событий имеет линейную форму, расположенную под углом β = 51° к оси образца (рис.2, *а*, верхняя часть образца). При сопоставлении распределения гипоцентров событий (рис.2, *а*) с фотографией образца после испытаний (рис.2, *в*) можно заключить, что данное направление соответствует основному разрушению, образовавшемуся в виде макротрещины (светлый след на образце).

Расчет плотности событий образца Б осуществлялся для слоев толщиной 5 мм с разрешением 20×50. На рис.3 показаны локации гипоцентров событий АЭ, карты плотности событий и образец после испытаний [35]. Из рис.3, *а* видно, что структура трещинообразования существенно отличается от образца А гнейсовой текстуры. Она характеризуется объемным распределением с тенденцией к локализации гипоцентров. С помощью процедуры томографии было выявлено два отчетливых кластера сферической формы на отличающихся по высоте уровнях (рис.3, *б*, *в*). В то же время макроразрушение, как видно на рис.3, *г*, сформировалось в виде прямолинейного разрыва

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 136-145
© В.Л.Трушко, М.Д.Ильинов, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2026

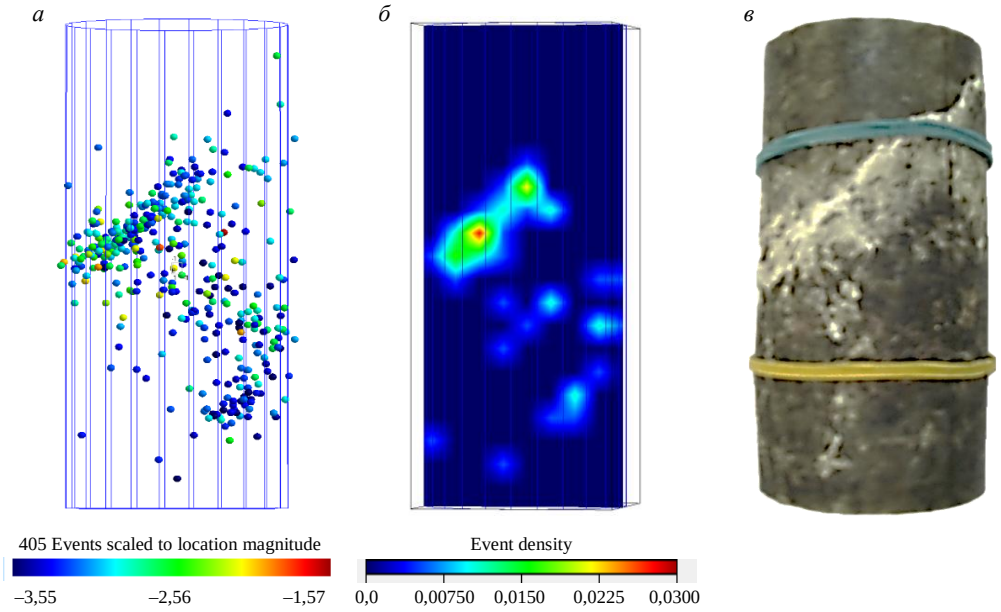


Рис.2. Анализ зоны микротрещиноватости для мелкозернистого образца А гнейсовой текстуры (предел прочности 467 МПа): *а* – распределение гипоцентров событий АЭ за все время испытания; *б* – карта плотности событий; *в* – образец после испытаний

с углом β, приблизительно равным 21°. Данный угол лежит в диапазоне величин, предсказанных в работе [32] для хрупкого разрушения.

Расчет плотности событий образца В осуществлялся для слоев толщиной 2,5 мм с разрешением 22×55. На рис.4 показаны локации гипоцентров событий АЭ, карты плотности событий и образец после испытаний. Распределение гипоцентров здесь наиболее рассеянно (рис.4, *а*) по сравнению с предыдущими образцами. В то же время детализация результатов локации выявляет два характерных скопления с максимальной по сравнению с предыдущими образцами плотностью событий (рис.4, *б*, *в*). Из рис.4, *г* видно, что макроразрушение сформировалось в виде плавной изогнутой линии. Анализ эволюции процесса разрушения во времени, параметрами которого являются активность и *b*-фактор АЭ, показал, что данную кривую макроразрыва можно приближенно разложить на

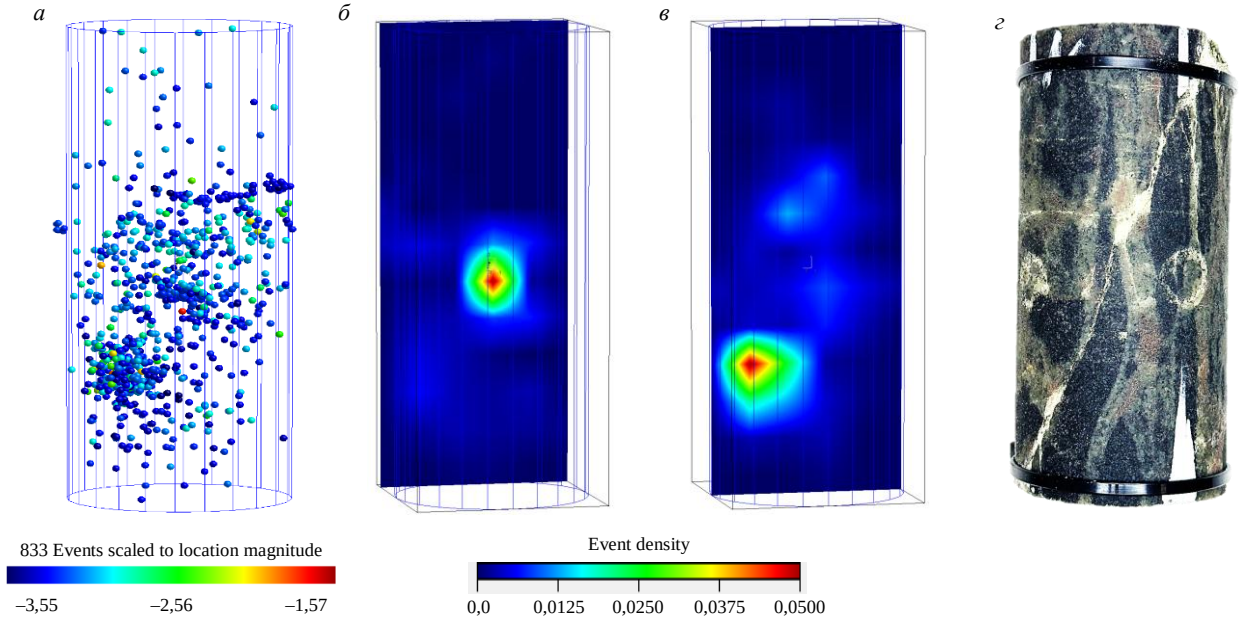


Рис.3. Анализ зоны микротрещиноватости для мелкозернистого образца Б полосчатой текстуры (предел прочности 520 МПа): *а* – распределение гипоцентров событий АЭ за все время испытания; *б* – карта плотности событий, выявляющая первый кластер; *в* – карта плотности событий, выявляющая второй кластер; *г* – образец после испытаний

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, М.Д.Ильинов, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2026

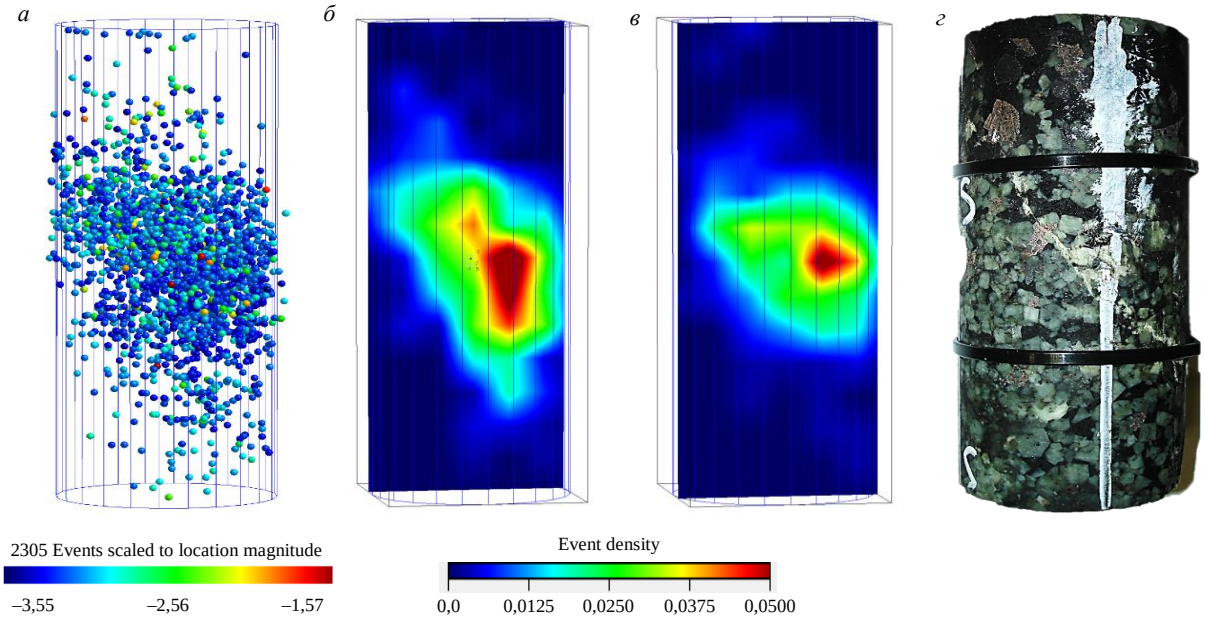


Рис.4. Анализ зоны микротрещиноватости для крупнозернистого образца В массивной текстуры (предел прочности 341 МПа): *а* – распределение гипоцентров событий АЭ за все время испытания; *б* – карта плотности событий, первое скопление; *в* – карта плотности событий, второе скопление; *г* – образец после испытаний

две прямые линии (рис.5). Эти линии выявляются последовательно, если построить распределения гипоцентров отдельно для событий первого пика активности, соответствующего интервалу 4100-5100 с на рис.6, и для событий основного пика активности для интервала 9800-10600 с.

Таким образом, по распределениям гипоцентров АЭ произведена визуальная оценка преобладающего направления размещений источников для стадии промежуточного всплеска активности АЭ и для основного пика, связанного с разрушением. Угол наклона β для линии, соответствующей стадии первого пика, равен 34,6° (см. рис.5, *а*), а для линии второго пика – 44,5° (см. рис.5, *б*). Можно представить развитие разрушения таким образом, что зона трещиноватости как бы разворачивается с течением времени против часовой стрелки, что и приводит к плавному искривлению линии результирующего разлома. Такого рода поворот можно также отметить на картах плотности (см. рис.4, *б*, *в*) распределений полного числа событий за все время испытания. Карты плотности соответствуют двум слоям, отображающим распределение в разных областях образца.

С целью анализа процесса трещинообразования во времени рассчитывались тренды активности и *b*-фактора АЭ. На рис.6 представлены результаты расчета активности и *b*-фактора для образца В массивной текстуры. Причем активность выведена на график для всех локационных событий, зарегистрированных в течение испытания, а *b*-фактор только для интервалов в области первого и второго пика активности. Далее для этих интервалов рассчитывалось среднее значение *b*-фактора, обозначенное в виде уровня зеленой линией на рис.6. Такое представление информации наиболее отчетливо выявляет признаки некритического и критического процессов трещинообразования. Некритический процесс образования макротрещины соответствует устойчивому состоянию образца и не приводит к катастрофическому разрушению. На рис.6 такое

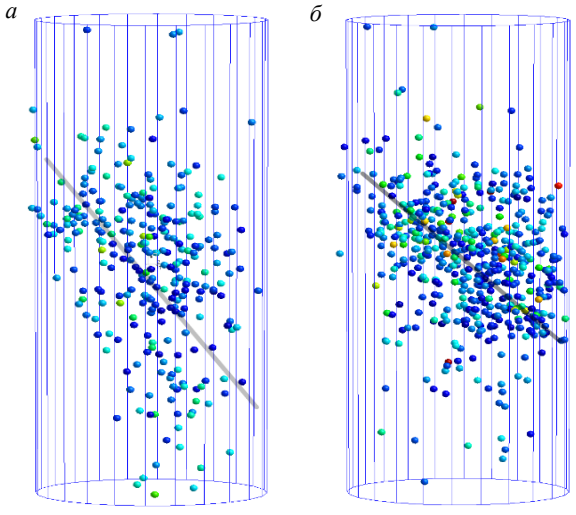


Рис.5. Разложение результирующего разлома для образца В на два преобладающих направления: *а* – по распределению гипоцентров событий, соответствующих выборке 4463-4767 с на временной оси, область первого пика активности АЭ; *б* – по распределению гипоцентров событий, соответствующих выборке 10334-10619 с на временной оси, область второго пика активности АЭ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Л.Трушко, М.Д.Ильинов, А.О.Розанов, М.М.Саитгалеев, Д.Н.Петров, Д.А.Карманский, А.А.Селихов, 2026

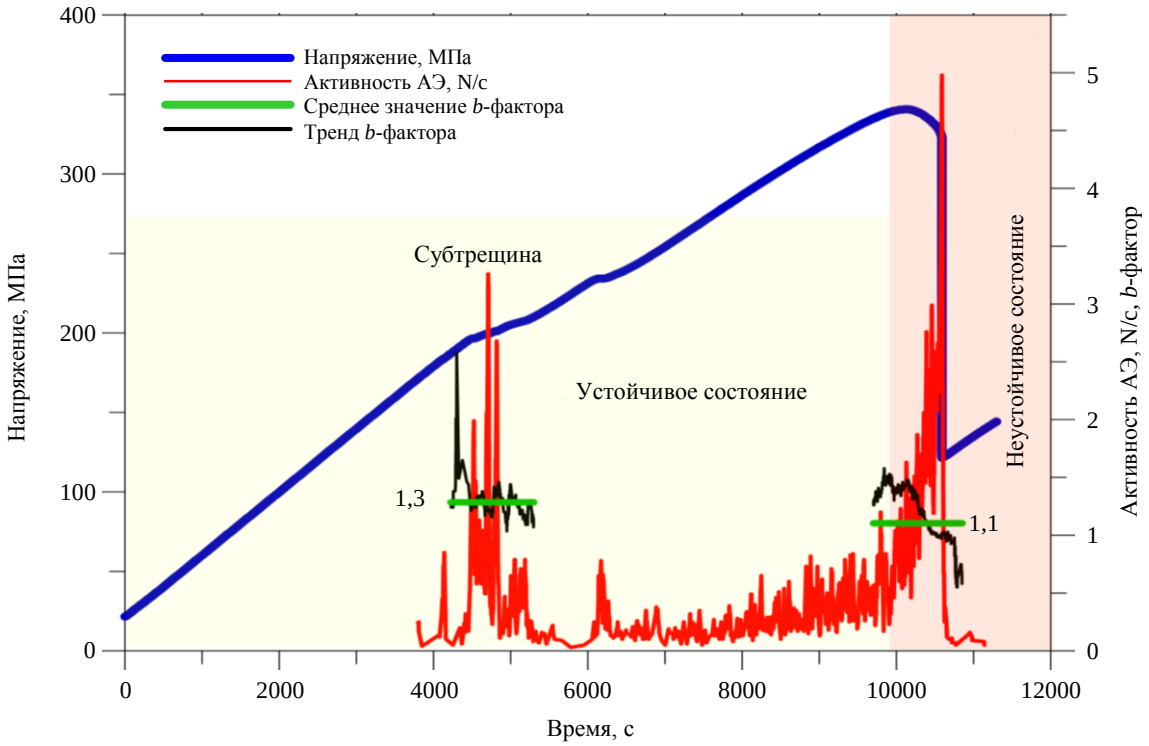


Рис.6. Тренды активности и *b*-фактора АЭ для образца В в сопоставлении с кривой нагружения

образование обозначается как субтрещина. Оно характеризуется пиком активности, равным 3,26 N/c, и средним значением *b*-фактора на интервале 1,3. Критический процесс образования макротрещины соответствует неустойчивому состоянию образца и приводит к катастрофическому разрушению, характеризующемуся максимальным значением активности и резким падением напряжения. Здесь пик активности равен 4,98 N/c, а среднее значение *b*-фактора на данном интервале соответствует 1,1. Таким образом, для данного образца выявляются критерии устойчивого и неустойчивого состояния в процессе трещинообразования. Устойчивое состояние характеризуется меньшим пиком активности и большим средним значением *b*-фактора. При этом процесс трещинообразования протекает интенсивно уже при нагрузке, составляющей 59 % от предела прочности. На данном интервале образуется субтрещина под углом β, равным 34,6° (см. рис.5, *а*). Неустойчивое состояние, приводящее к хрупкому разрушению, характеризуется большим пиком активности и меньшим средним значением *b*-фактора. При этом угол разлома β увеличивается до 44,5° (см. рис.5, *б*).

Обсуждение результатов

В работе рассмотрены особенности формирования зоны микротрещиноватости в зависимости от типа неоднородности горной породы. Образцы А и Б характеризуются текстурной неоднородностью: образец А имеет сетчатое строение (гнейсовидная текстура с углом к наибольшему главному напряжению 50-60°), образец Б – полосчатое строение (полосчатые неоднородности расположены соосно с наибольшим главным напряжением). Образец В характеризуется вещественной неоднородностью, связанной с неравномерным распределением зерен различных минералов. С помощью метода локации источников акустической эмиссии установлено, что данные типы неоднородности формируют различные структуры микротрещиноватости при одинаковых условиях нагружения.

Разрушение образца А происходит за счет образования макротрещины под углом 51° к оси образца (см. рис.2), близким к ориентации гнейсовидной текстуры. Процедура локации однозначно выявляет линейную структуру распределения гипоцентров, связанную с макроразрывом (см. рис.2, *а*). С помощью томографии в нижней части образца обнаружены еще два характерных линейных скопления гипоцентров меньшей плотности, расположенных параллельно основному (см. рис.2, *б*). Очевидно, что они также относятся к формирующимся по слоистости площадкам скольжения. Таким образом, можно заключить, что в образце А разрушение определяется слоистой текстурой породы, которая при данной ориентации и условиях нагружения обуславливает пластический механизм деформации.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Совсем другим образом формируется зона трещиноватости в образце Б (см. рис.3). Гипоцентры имеют объемное распределение (см. рис.3, *а*), но с явно выраженными скоплениями-кластерами (см. рис.3, *б*, *в*). Кластеры приближенно описываются сферической формой. Предположительно природа их образования связана с интенсивным процессом разрушения в местах полосчатых вкраплений. Разлом имеет вид строго диагональной трещины, составляющей угол β, равный 21°. Согласно модели [32] макроразрушение характеризуется как хрупкое.

Согласно тренду активности (рис.6) и сложной кривой нагружения для образца В процесс образования результирующего макроразлома можно разделить на две составляющие. На основании соответствия событий стадии первого пика активности (рис.6) преобладающему направлению первой линии (см. рис.5, *а*) предполагаем, что в течение данного интервала нагружения развивалась субтрещина, не приведшая к макроразрушению и потери устойчивости образца. Угол β образования субтрещины оценивается равным 34,6°. На интервале, соответствующем второму пику активности, происходит формирование катастрофического разлома, характеризующегося образованием трещины под углом 44,5° (см. рис.5, *б*). Такого рода поворот макротрещины против часовой стрелки в процессе разрушения физически можно интерпретировать как уменьшение угла внутреннего трения и модуля деформации, которое можно наблюдать на кривой нагружения (рис.6) после первого пика активности. Порода становится трещиноватой и ее прочностные свойства изменяются. Исследования прочностных свойств различных пород проводились, например, в работах [36, 37]. Распределение накопленных за время всего испытания событий имеет вид сильно рассеянного облака, по которому невозможно выявить направление результирующего разлома (см. рис.4, *а*). Это говорит об отчетливом проявлении свойства дилатансии с образованием обширной сети микротрещин.

Заключение

Лабораторные исследования процесса деформирования и разрушения образцов горных пород различных литологических типов при объемном напряженном состоянии на сервогидравлической прессовой установке MTS 815 с интегрированной в нее системой акустической эмиссии Milne DAQ позволили изучить процесс трещинообразования и разрушения образцов во времени, тренды активности акустической эмиссии и *b*-фактора.

В результате установлено:

• При одинаковых условиях объемного нагружения образцов разных литологических типов гнейсовой, полосчатой и массивной текстуры формируются различные структуры микротрещиноватости и механизмы их разрушения.

• В мелкозернистых образцах гнейсовой текстуры разрушение происходит за счет образования макротрещины под углом 51° к оси образца, близким к ориентации гнейсовидной текстуры. При этом развивается пластический процесс деформации.

• В мелкозернистых образцах полосчатой текстуры разрушение происходит путем формирования диагональной трещины с образованием двух ярко выраженных кластеров. Угол макротрещины при этом составляет 21° по отношению к оси образца, и процесс характеризуется как хрупкий.

• В крупнозернистых образцах массивной текстуры разрушение формируется в две стадии активности акустической эмиссии. На первом пике активности формируется субтрещина под углом β = 34,6°, не приводящая к разрушению, а на втором пике образуется разлом под углом β = 44,5° с обширной сетью микротрещин. При этом проявляются свойства дилатансии.

Дальнейшие экспериментальные исследования планируется проводить в термобарических условиях, моделирующих большие глубины (до 10 км) на серии образцов для повышения достоверности испытаний и выявления закономерностей их разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M.* An Investigation into Current Sand Control Methodologies Taking into Account Geomechanical, Field and Laboratory Data Analysis // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 12. № 125. DOI: 10.3390/resources10120125

2. *Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.* Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 658-666. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.5

3. *Босиков И.И., Клюев Р.В., Гаврина О.А.* Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харбижинского участка (Северный Кавказ) // Геология и геофизика Юга России. 2021. Т. 11. № 1. С. 6-21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Петраков Д.Г., Купавых К.С., Купавых А.С.* Экспериментальное исследование упруго-пластичных свойств пород нефтяного пласта с учетом насыщенности // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 3 (327). С. 33-38. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-3(327)-33-38

5. *Glassley W.E.* Geothermal Energy. Renewable Energy and the Environment. CRC Press, 2010. 320 p. DOI: 10.1201/EBK1420075700

6. *Krumbholz J.F., Krumbholz M., Wadas S.H., Tanner D.C.* Characterisation of the fracture- and karst-controlled geothermal reservoir below Munich from geophysical wireline and well information // Geothermal Energy. 2024. Vol. 12. № 9. DOI: 10.1186/s40517-024-00286-6

7. *Кашников Ю.А., Шустов Д.В., Якимов С.Ю.* Учет геомеханического состояния трещинно-порового коллектора при гидродинамическом моделировании // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16217. С. 42-52.

8. *Путилов И.С., Винокурова Е.Е., Гуляева А.А. и др.* Создание концептуальной геологической модели, основанной на литолого-петрографических исследованиях, на примере пермокарбоновой залежи Усинского месторождения // Недропользование. 2020. Т. 20. № 3. С. 214-222. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.2

9. *Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Kunshin A.A., Kovalev D.A.* Development of Hydraulic Turbodrills for Deep Well Drilling // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 16. № 7517. DOI: 10.3390/app11167517

10. *Кучеров В.Г., Бессель В.В.* Вызовы и риски глубокого и сверхглубокого бурения // Бурение и нефть. 2020. № 3. С. 12-16.

11. *Protosenya A.G., Verbilo P.E., Karasev M.A.* Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Iss. 11. P. 1962-1972.

12. *Trushko V.L., Protosenya A.G., Verbilo P.E.* Predicting strength of pillars in fractured rock mass during development of apatite-nephelinic ores // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. № 8. P. 2864-2872.

13. *Вербило П.Э., Иовлев Г.А., Беляков Н.А.* Методика подбора параметров модели Хука – Брауна с разупрочнением для массива горных пород на основе лабораторных испытаний образцов и численных экспериментов трещиноватого массива в дискретной постановке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 2. С. 57-77. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_57

14. *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

15. *Tongwen Jiang, Wei Yao, Xiongwei Sun et al.* Evolution of anisotropic permeability of fractured sandstones subjected to true-triaxial stresses during reservoir depletion // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 200. № 108251. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108251

16. *Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н.* Оценка удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения (Кольский полуостров) // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 75-82. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-75-82

17. *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

18. *Карасев М.А., Петрушин В.В., Рысин А.И.* Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 48-66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48

19. *Dresen G., Kwiatek G., Goebel T., Ben-Zion Y.* Seismic and Aseismic Preparatory Processes Before Large Stick–Slip Failure // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177. Iss. 12. P. 5741-5760. DOI: 10.1007/s00024-020-02605-x

20. *Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л., Носов Ю.Г. и др.* Формирование дефектной структуры монокристалла кварца на ранних этапах деформирования // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. Вып. 4. С. 455-461. DOI: 10.21883/FTT.2022.04.52185.262

21. *Гиляров В.Л., Дамаскинская Е.Е.* Моделирование акустической эмиссии и разрушения поликристаллических гетерогенных материалов методом дискретных элементов // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. Вып. 6. С. 676-682. DOI: 10.21883/FTT.2022.06.52394.29

22. *Davidsen J., Goebel T., Kwiatek G. et al.* What Controls the Presence and Characteristics of Aftershocks in Rock Fracture in the Lab? // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. Vol. 126. Iss. 10. № e2021JB022539. DOI: 10.1029/2021JB022539

23. *Sheng-Qi Yang, Jing Yang, Zong-Long Mu et al.* Experimental Study on Mechanical Behavior, Fracture Characteristics, and Acoustic Emission Damage Characteristics of Sandstone Under Triaxial Multistage Stress Disturbance // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024. Vol. 57. Iss. 10. P. 8633-8655. DOI: 10.1007/s00603-024-03994-4

24. *Jianfeng Liu, Yang Wu, Junjie Liu et al.* Acoustic emission evolution and fracture mechanism of rock for direct tensile failure // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2025. Vol. 185. № 105974. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105974

25. *Boese C.M., Kwiatek G., Plenkers K. et al.* Performance Evaluation of AE Sensors Installed Like Hydrophones in Adaptive Monitoring Networks During a Decametre-Scale Hydraulic Stimulation Experiment // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023. Vol. 56. Iss. 10. P. 6983-7001. DOI: 10.1007/s00603-023-03418-9

26. *Рассказов М.И., Терешкин А.А., Цой Д.И. и др.* Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12-1. С. 167-182. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167

27. *Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R.* Refining Low Strain Pile Integrity Testing for Minor Flaw Detection with Complex Wavelet Transform // Civil Engineering Journal. 2024. Vol. 10. № 10. P. 3194-3207. DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-10-05

28. *Shuting Miao, Peng-Zhi Pan, Arno Zang et al.* Laboratory Shear Behavior of Tensile- and Shear-Induced Fractures in Sandstone: Insights from Acoustic Emission // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2024. Vol. 57. Iss. 8. P. 5397-5413. DOI: 10.1007/s00603-024-03780-2

29. *Davis R.O., Selvadurai A.P.S.* Plasticity and Geomechanics. Cambridge University Press, 2002. 287 p. DOI: 10.1017/CBO9780511614958

30. *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

31. *Stanchits S., Yarushina V., Sabitova A. et al.* Dilatancy in Shale During a Creep Monitored by Volumetric Deformation, Acoustic Emission, and Ultrasonic Transmission Techniques // 85th EAGE Annual Conference & Exhibition. 2024. Vol. 2024. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.202410540

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *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

33. *Pollard D.D., Segall P.* 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

34. *Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. 1944. Vol. 34. № 4. P. 185-188. DOI: 10.1785/BSSA0340040185

35. *Трушко В.Л., Розанов А.О., Саитгалеев М.М. и др.* 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.

36. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.

37. *Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н.* Анализ условий разрушения скальных горных пород в динамической форме при трехосном сжатии // Наукосфера. 2020. № 11 (2). С. 77-85. DOI: 10.5281/zenodo.4309363

***Авторы*: Владимир Леонидович Трушко,** *д-р техн. наук, директор Научного института «Глубинная метагеология»* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Trushko_VL@pers.spmi.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-9742-1076*, **Михаил Дмитриевич Ильинов,** *канд. техн. наук, заведующий лабораторией* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0007-2185-8638*, **Александр Олегович Розанов,** *старший научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0006-4615-0401*, **Малик Маратович Саитгалеев,** *ведущий инженер* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-9859-5799*, **Дмитрий Николаевич Петров,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-5513-1871*, **Даниил Александрович Карманский,** *ведущий инженер* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3214-5322*, **Александр Александрович Селихов,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0009-0005-8163-2249*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0