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

Исследование особенностей разрушения андезита и песчаника в условиях квазистатического и динамического нагружения

И.А.Банникова✉, С.В.Уваров, Д.В.Ефремов, М.В.Банников
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Банникова И.А., Уваров С.В., Ефремов Д.В., Банников М.В. Исследование особенностей разрушения андезита и песчаника в условиях квазистатического и динамического нагружения // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 77-90. EDN QCVFAN

Аннотация
Проведено экспериментальное исследование природных материалов, таких как песчаник и андезит, часто встречающихся в горно-, нефте-, газодобывающей промышленности и при строительстве дорог. Образцы цилиндрической формы испытывались под действием квазистатического и динамического нагружений в условиях сохранения фрагментов. Для установления стадийности и механизмов разрушения, определения распространения трещин в материале образцы исследовались методом рентгеновской томографии до и после испытаний. Квазистатическое одноосное сжатие осуществлялось с регистрацией полей деформации методом корреляции цифровых изображений и сигналов акустической эмиссии *in situ*. Выявлены отличительные особенности разрушения андезита и песчаника. Разрушение андезита, состоящего из твердой и мягкой фаз, происходит по мягкой фазе по квазихрупкому сценарию, а размер фрагментов соответствует твердой фазе. При формировании магистральных вертикальных трещин по всему объему песчаника достаточно однородного материала, состоящего из прочных, слабо связанных между собой песчинок, резкого падения несущей способности не наблюдалось благодаря тому, что песчинки продолжали удерживаться вместе за счет сил трения в условиях сжатия. После снятия нагрузки образец рассыпался на фрагменты. Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в две стадии – накопление повреждений (появление множества магистральных трещин, сонаправленных с линиями максимального напряжения) и образование дочерних трещин с последующим полным разрушением. В случае динамического сжатия при достаточном значении энергии нагружающего импульса происходило полное фрагментирование образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов. Результаты работы предполагается использовать при создании численных моделей разрушения с учетом кинетики зарождения и роста дефектов в горных породах, в том числе для оптимизации процессов бурения.

Ключевые слова
разрушение горных пород; квазистатическое и динамическое нагружения; поле деформации; акустическая эмиссия; рентгеновская томография; электронная микроскопия; рентгеноструктурный анализ; корреляция цифровых изображений; андезит; песчаник

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 20-41-596013, и в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН (тема № 124020200116-1).

Поступила: 27.06.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 27.06.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Горные породы играют ключевую роль в геологических процессах и имеют важное значение для понимания эволюции земной коры. Изучение их механических свойств и стадийности перехода к разрушению [1] под воздействием различных нагрузок является актуальной задачей современной геологии и материаловедения. Квазистатическое сжатие позволяет изучить медленные и постепенные процессы, происходящие в породах, в то время как динамическое сжатие моделирует быстрые и интенсивные нагрузки, характерные для природных катастроф [2, 3] и геологических процессов [4-6], а также процессов горной добычи, в том числе взрывными методами [7, 8].

Проведено множество экспериментальных и теоретических работ [9], посвященных исследованию механизмов, приводящих к деформации и разрушению конденсированных сред, таких как

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

каменистые горные породы [10-12], песчаники (глины) [13-15], стекла [16], жидкости (как неотъемлемые связующие в горной породе) [17, 18], стеклокерамики [19], керамики (композиты) [20, 21] и др. [22, 23], в широком диапазоне скоростей нагружения 10^{-4}-10^{9} $с^{-1}$. Такие работы являются актуальными и затрагивают многие сферы деятельности человека: моторо-, машино-, самолето- и кораблестроение, архитектура, строительство [24-26], горно-, нефте- и газодобывающая промышленность [27-29], космическая инженерия [30]. В экспериментальных [31, 32] и теоретических работах [33, 34] представлены интерпретация прогнозирования и описание динамики процесса разрушения образцов горных пород.

В настоящей работе в дополнение к фундаментальным исследованиям авторов [35] проведено комплексное исследование горных пород, чаще всего встречающихся при бурении скважин в горнодобывающей промышленности, при строительстве автомобильных и железных дорог, – песчаника и андезита. Из-за разнообразия этих пород прочностные свойства их образцов с разных месторождений могут существенно отличаться. Динамическое разрушение песчаника и андезита мало изучено. Для установления стадийности и механизмов разрушения этих пород проведено экспериментальное исследование материалов в условиях квазистатического и динамического нагружений с совместной регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) [16] и полей деформации методом корреляции цифровых изображений (DIC – digital image correlation) [36, 37]. В настоящее время АЭ и DIC приобретают все большую популярность в качестве методов исследования разрушения горных пород. Акустическая эмиссия обеспечивает высокую чувствительность к изменениям в структуре породы и позволяет получать информацию о динамике разрушения в режиме реального времени, тогда как анализ корреляции изображений точно определяет геометрические параметры трещин и их распределение. Эти методы помогают оценить механические свойства пород, прогнозировать их поведение при нагрузках и оценивать стадийность перехода от поврежденности к разрушению.

Методы

Образцы. Для исследований подобраны две характерные горные породы, чаще всего встречающиеся при бурении скважин, формировании карьеров месторождений и строительстве дорог. Песчаник предоставлен НТЦ «Газпромнефть» (Ботуобинский горизонт, глубина забора 2920-2950 м, за пределами месторождения разведывательной скважины). Андезит собран в зоне установки опор кресельной канатной дороги на Эльбрус, высота 2350 м над уровнем моря, Кабардино-Балкарская Республика, пос. Терскол. Оба вида материала с предполагаемыми элементами кварцита. Для испытаний вырезались образцы цилиндрической формы. Максимальный размер образца был ограничен размерами установки для проведения динамических испытаний. Для соблюдения одинаковых начальных условий образцы при квазистатическом сжатии были той же формы. Масштабный фактор в данной работе не исследовался. Но, исходя из данных томографии образцов песчаника и андезита, характерные масштабы структурной гетерогенности меньше размеров образца. Можно предположить, что образец песчаника таких размеров составляет структуру пласта, из которого был взят, поэтому для таких образцов отсутствует влияние масштабного фактора. Параметры образцов и условия нагружения представлены в табл.1. Отличие андезита от песчаника состояло в том, что плотность песчаника варьировалась в более широком диапазоне – 2057-2600 $кг/м^3$.

Таблица 1

Параметры и условия нагружения образцов

Материал	Номер образца	Метод нагружения	Средний диаметр d, мм	Средняя высота h, мм	Плотность ρ, $кг/м^3$		Начальная масса m, г
Песчаник	San1, San2, San3, San4	DL	10,80±0,01	10,20±0,01	2057-2600		1,82-2,58±0,0001
	San5, San6	QSL					1,9777±0,0001 2,0448±0,0001
Андезит	Mou1	QSL	11,06±0,01	11,79±0,01	2534	2545±48	2,8712±0,0001
	Mou2		11,04±0,01	10,23±0,01	2528		2,4763±0,0001
	Mou3	DL	11,05±0,01	11,24±0,01	2553		2,7522±0,0001
	Mou4		11,06±0,01	11,48±0,01	2563		2,8278±0,0001

Примечание. DL (dynamic loading) – динамическое нагружение; QSL (quasi-static loading) – квазистатическое нагружение.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Исследование состава материала методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Элементный состав исследовался по *K*-серии рентгеновского излучения с помощью системы энергодисперсионного анализа Oxford Instruments INCA X-ACT Spectrometer к электронному микроскопу Hitachi S-3400. Химический состав необходим для идентификации образцов (горные породы из различных месторождений могут различаться). Химический состав исследуемых материалов определялся при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с приставкой к микроскопу INCA (под руководством В.П.Бачурихина, лаборатория электронной микроскопии, Пермский государственный национальный исследовательский университет). Состав образца песчаника San6 представлен в табл.2. В данном материале преобладают следующие элементы: O (53,2-53,91 %), Si (23,26-25,28 %), т.е. кварцит с включением Al (8,63-8,86 %), Fe (4,00-4,37 %), Na (2,08-2,79 %), K (2,37-2,62 %) и небольшое количество Cl, Mg, Ca, Ti, S.

Таблица 2

Состав песчаника

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O *K*	53,20	67,85	53,91	68,36
Na *K*	2,79	2,48	2,08	1,83
Mg *K*	1,43	1,20	1,32	1,10
Al *K*	8,86	6,70	8,63	6,49
Si *K*	23,26	16,90	25,28	18,26
S *K*	0,24	0,15	–	–
Cl *K*	2,19	1,26	1,27	0,73
K *K*	2,62	1,37	2,37	1,23
Ca *K*	0,59	0,30	0,68	0,34
Ti *K*	0,44	0,19	0,46	0,20
Fe *K*	4,37	1,60	4,00	1,45
Итого	100		100	

Состав андезита (анализировался фрагмент массива, из которого были вырезаны образцы) представлен в табл.3. В исследуемом материале преобладают следующие элементы: O (61,08-63,26 %), Si (23,79-24,63 %), Al (5,94-6,28 %), Na (2,86-3,58 %), K (1,46-1,50 %), не исключается присутствие Ca (0,77-0,95 %), Fe (0,37-0,89 %).

Андезит имел белые включения, анализ которых проводился с помощью микроскопа дополнительно (табл.4). Во включении больше всего кварцита SiO_2 (O 57,9-58,53 %, Si 23,73-23,99 %) с небольшой примесью Al, Na, Ca, K, Fe.

Для сравнительного анализа проведено дополнительное исследование кварцита, полученного с центрального плато Уганды (Африка), с помощью электронной сканирующей микроскопии (табл.5): содержание элементов SiO_2 (O 61,12-63,06 %, Si 36,94-38,88 %) с небольшой примесью включений, в составе которого находились следующие элементы: O 53,3 %, Si 21,73 %, Al 13,53 %, K 6,76 %, Fe 2,83 %, Mg 1,16 %, Na 0,68 %.

Таблица 3

Состав андезита

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O *K*	61,08	73,33	63,26	74,99
Na *K*	2,86	2,39	3,58	2,95
Mg *K*	2,15	1,70	0,49	0,38
Al *K*	5,94	4,23	6,28	4,41
Si *K*	24,63	16,84	23,79	16,06
K *K*	1,50	0,74	1,46	0,71
Ca *K*	0,95	0,46	0,77	0,36
Fe *K*	0,89	0,31	0,37	0,13
Итого	100		100	

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 77-90
© И.А.Банникова, С.В.Уваров, Д.В.Ефремов, М.В.Банников, 2025

Таблица 4

Состав включения белого цвета андезита

Элемент	Испытание 1		Испытание 2	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O *K*	57,90	70,88	58,53	71,45
Na *K*	3,47	2,96	3,67	3,12
Al *K*	9,76	7,09	8,83	6,39
Si *K*	23,73	16,55	23,99	16,68
K *K*	1,17	0,59	1,35	0,67
Ca *K*	3,96	1,94	3,00	1,46
Fe *K*	–	–	0,62	0,22
Итого	100,00		100,00	

Таблица 5

Состав кварцита и его включений

Элемент	Испытание 1		Испытание 2		Состав включений	
	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%	Количество, мас.%	Объем, ат.%
O *K*	61,12	73,40	63,06	74,98	53,30	67,88
Na *K*	–	–	–	–	0,68	0,61
Mg *K*	–	–	–	–	1,16	0,98
Al *K*	–	–	–	–	13,53	10,22
Si *K*	38,88	26,60	36,94	2,02	21,73	15,76
K *K*	–	–	–	–	6,76	3,52
Fe *K*	–	–	–	–	2,83	1,03
Итого	100		100		100	

Для определения фазового состава представленные горные породы (кварцит, андезит, песчаник) были исследованы методом рентгеноструктурного анализа. Исследования проводились методом порошков, съемка осуществлялась на рентгеновском аппарате УРС-60 с помощью камеры РКУ (d = 114,6 мм) на фотопленку[1], излучение анода – Co. Полученные рентгенограммы представлены на рис.1. Все представленные горные породы имеют кристаллическую структуру. Гало, соответствующее аморфной фазе, отсутствует. Опираясь на данные элементного состава, можно предположить, что материал (кварцит) представляет собой SiO_2 в чистом виде (рис.1, *а*). Оценка межплоскостных расстояний по рентгенограмме на рис.1, *а* и сравнение их с табличными значениями[2] подтвердило, что в кварците преобладает α-кварц. Линии на рентгенограммах рис.1, *а* совпадают с линиями рентгенограммы на рис.1, *б*, *в*, следовательно, материалы из андезита

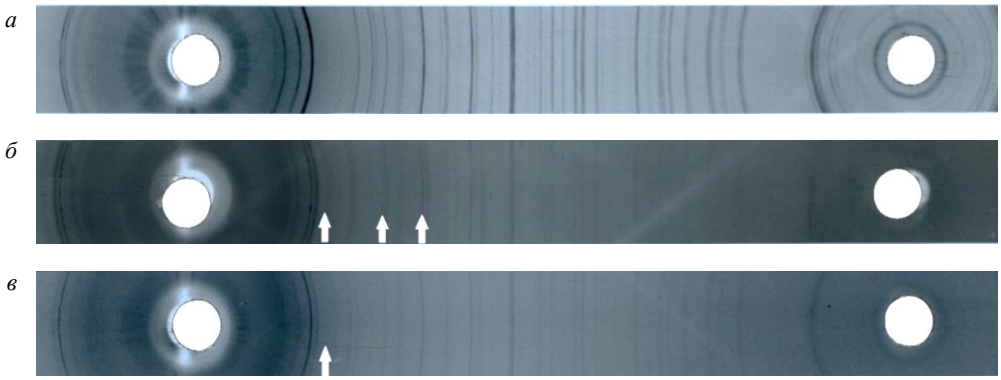


Рис.1. Рентгенограммы исследуемых горных пород: кварцит (*а*); андезит (*б*); песчаник (*в*)

[1] *Китайгородский А.И.* Рентгеноструктурный анализ. М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. 650 с.

[2] *Миркин Л.И.* Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 862 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и песчаника также содержат α-кварц в большом количестве, что соответствует результатам элементного состава. Андезит и песчаник содержат дополнительные фазы. Элементный состав показывает, что природные материалы содержат в небольшом количестве доломит ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$). На рентгенограмме (рис.1, *б*) прослеживаются три наиболее интенсивные линии межплоскостных расстояний d/n = 2,89; 2,19; 1,80, соответствующие доломиту, на рис.1, *в* прослеживается одна наиболее интенсивная линия с межплоскостным расстоянием d/n = 2,89, соответствующая доломиту (отмечена стрелкой)[3].

Определение фазового состава горных пород методом рентгеноструктурного анализа весьма затруднительно, однако в совокупности с методом определения элементного состава и сравнения дифракционных картин уже известных веществ может быть использовано для быстрого определения фазового состава горных пород, присутствия аморфной или кристаллической фаз.

Квазистатическое нагружение природных материалов. Испытания образцов из природных материалов – песчаника и андезита – проводились на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AG-X plus совместно с приложением TRAPEZIUM X, осуществляющей одноосное квазистатическое сжатие. Испытания проводились с регистрацией полей деформации *in situ* методами корреляции цифровых изображений АЭ и DIC. Датчики регистрации АЭ были зафиксированы на верхней и нижней траверсах нагружающей машины Shimadzu AG-X plus. Камера LaVision Imager pro X была установлена напротив образца для регистрации полей деформации. Сохранность фрагментов реализовывалась за счет цилиндрического прозрачного экрана из ПММА, установленного на нижней траверсе. Скорость нагружения для всех образцов (San5, San6, Mou1, Mou2) была одинаковой – 0,5 мм/мин ($8{,}3 \cdot 10^{-6}$ м/с), а скорость деформации ~10^{-3} $с^{-1}$. Зависимости нагружающей силы от хода верхней траверсы представлены на рис.2, *а*, *б*. На кривых, полученных на образцах андезита (Mou1, Mou2), присутствуют скачки, связанные с образованием трещин, не приводящих к полной потере несущей способности образца. По достижении максимума (~9 и 13,2 кН соответственно) образцы разрушались. В отличие от песчаника, образцы андезита вели себя подобно композитной керамике [20]. При разрушении образцов из песчаника достигались максимальные значения по силе нагружения перед разрушением F ~ 2,75 кН (San6) и 2,85 кН (San5), но затем образцы начинали, вероятно, компактироваться (рис.2, *в*); на рис.2, *б* наблюдается выход на плато при одном и том же значении F ~ 0,8-1,2 кН (~8-12 МПа). Следовательно, песчаник ведет себя подобно пластичным материалам с выраженным пределом текучести, т.е. разрушение материала проходит в результате скольжения (сдвига) его слоев по определенным плоскостям, подобно пластическим материалам. Песчаник сохраняет несущую способность и форму после достижения предела прочности.

В работе проведена оценка среднего значения деформации для образцов андезита: Mou1 ~ 3 %, Mou2 – 5 %, для образцов из песчаника – 2,5 %. Оценены значения модуля деформации – для андезита ~3,1-2,8 ГПа, для песчаника – 1,2 ГПа. Данные, полученные при квазистатическом нагружении, далее использовались для выбора длины и скорости ударника при динамическом нагружении образцов. Внешний вид некоторых образцов песчаника и андезита сразу после нагружения представлены на рис.2, *в-д*. Для них характерно возникновение множественных магистральных трещин по высоте образца и образование большого количества фрагментов, соизмеримых с высотой образца. Результаты обработки сигналов системой регистрации АЭ для образцов из андезита и песчаника в условиях квазистатического нагружения приведены на рис.3. Сначала регистрируются одиночные импульсы (первые 50-70 с), связанные с зарождением магистральных трещин, а множество импульсов (начиная с 70-80 с) характерно для стадии объединения трещин, приводящей к полному разрушению образца. На рис.3, *д*, *е* показана вероятность распределения энергии импульсов больше некоторого заданного значения. Наблюдаются перегибы, которые связываются с переходными механизмами в процессе разрушения образцов. Протяженная ступенька на кумулятивном распределении энергии импульсов для песчаника (рис.3, *е*) может быть связана с псевдопластичным механизмом разрушения таких образцов.

[3] *Миркин Л.И.* Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 862 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

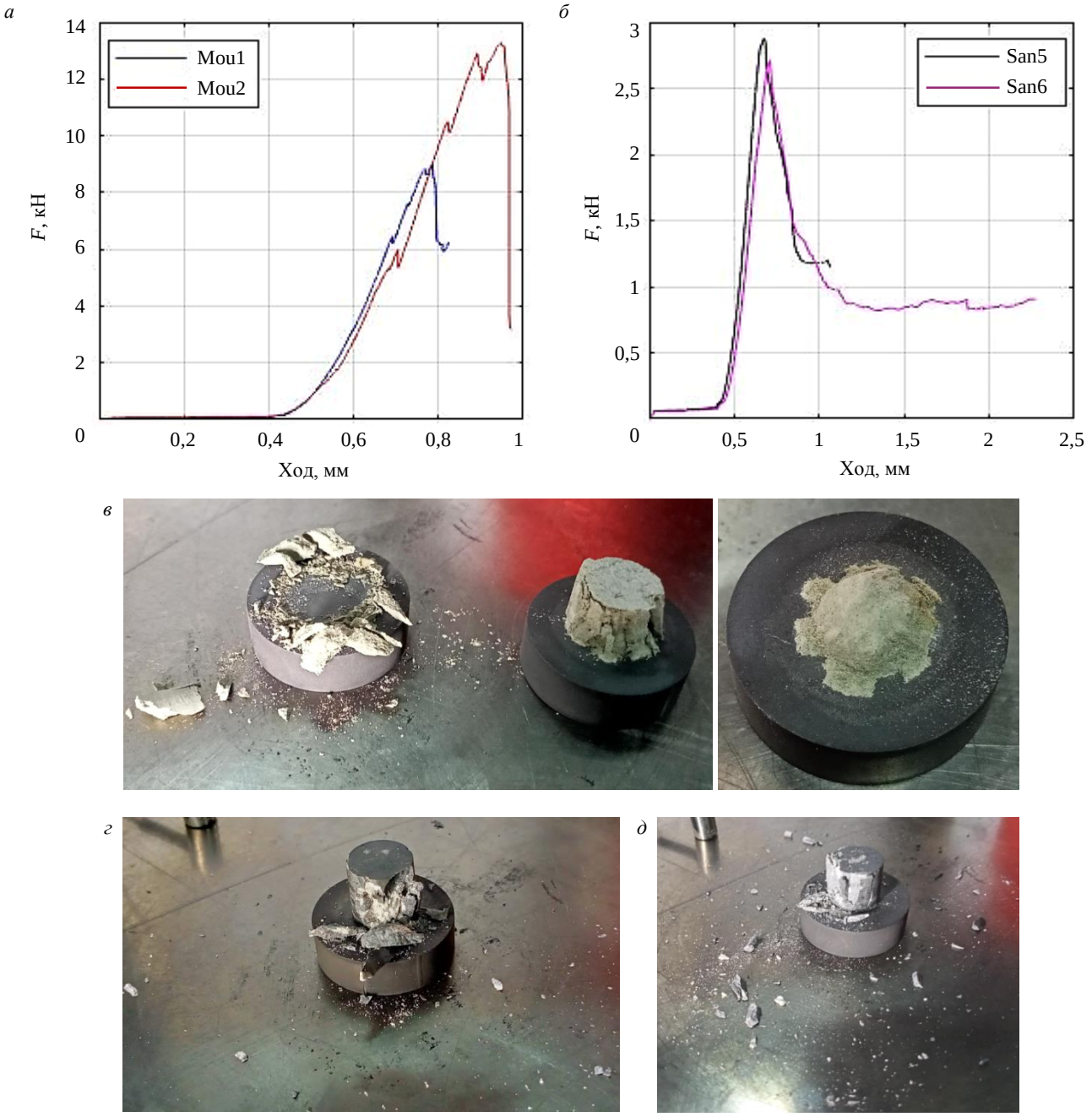


Рис.2. Зависимости приложенной силы от хода верхней траверсы испытательной машины Shimadzu AG-X plus для образцов андезита (*а*) и песчаника (*б*) и внешний вид образцов песчаника San6 (*в*) и андезита Mou1 (*г*), Mou2 (*д*) после квазистатического сжатия

Приведены поля деформаций в результате обработки данных системой регистрации DIC при испытаниях образцов из андезита (рис.4, *а*) и песчаника (рис.4, *б*) на квазистатическое сжатие. В образцах Mou1 и Mou2 в процессе нагружения наблюдаются растрескивание материала и образование сетчатой структуры по границам кварцитовых зерен (рис.4, *а*). В критический момент образец фрагментируется на большое число трехмерных фрагментов среднего размера и разрушается. В образцах песчаника (рис.4, *б*) явно выражено возникновение вертикальной магистральной трещины и на критическом этапе эксперимента – появление множества дочерних трещин по всему объему. Образец разрушается на крупные фрагменты и отдельные песчинки. Как показали данные рентгеновской томографии, в образцах природного материала нельзя исключать наличие трещин до испытаний.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

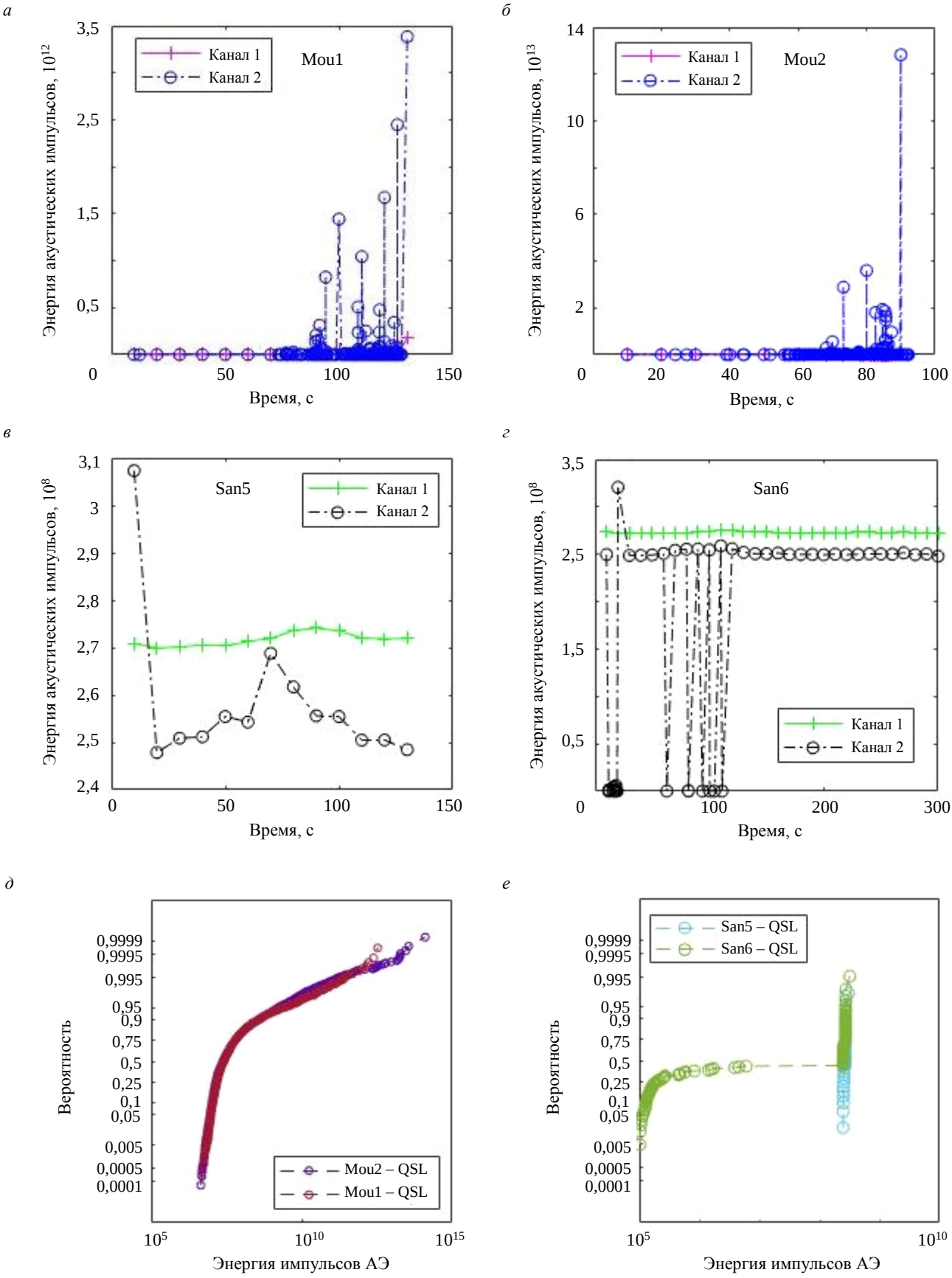


Рис.3. Сигналы энергии акустических импульсов с течением времени: для образцов андезита (*а*, *б*) и песчаника (*в*, *г*), а также вероятность распределения энергии импульсов при разрушении для андезита (*д*) и песчаника (*е*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© И.А.Банникова, С.В.Уваров, Д.В.Ефремов, М.В.Банников, 2025

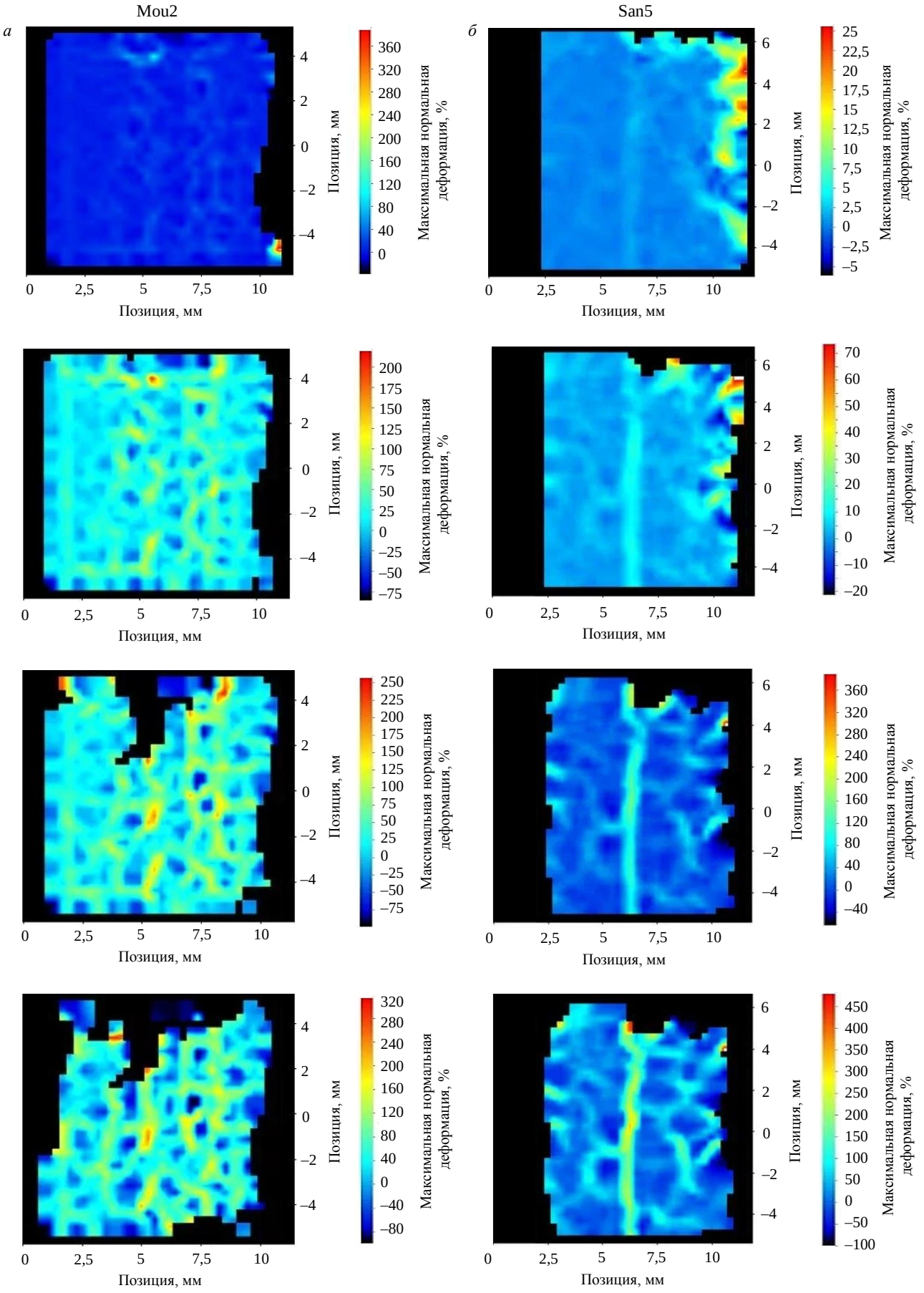


Рис.4. Данные полей деформаций методом DIC для образца андезита Mou2 (*а*) и образца песчаника San5 (*б*) в условиях квазистатического сжатия

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Динамическое нагружение образцов (песчаник, андезит) проводилось в условиях сохранения фрагментов и реализовывалось на модифицированной установке разрезных стержней Гопкинсона (РСГ-25) (лаборатория физических основ прочности, ИМСС УрО РАН, Пермь). Параметры эксперимента (длина и скорость ударника) выбирались такими, чтобы максимально достижимое давление на образец (определяемое скоростью ударника) и максимально достижимая деформация (определяемая скоростью и длиной ударника) гарантированно позволяли разрушить образец. Для оценки этих величин использовались данные квазистатического нагружения. Динамическое нагружение образцов андезита (Mou3, Mou4) проводилось при разных скоростях ударника – 9,8 и 20,8 м/с. При достижении максимальных значений напряжений для Mou3 (нагружающее напряжение σ = 143 МПа, деформация $\varepsilon = 7{,}5\cdot10^{-3}$) скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ равнялась 430 $с^{-1}$, для Mou4 (σ = 428 МПа, $\varepsilon = 15{,}3\cdot10^{-3}$) скорость деформации составила 1353 $с^{-1}$ (рис.5, *а*). Значение энергии разрушения определялось как площадь под деформационной кривой до σ_{max} для образца Mou3 – 0,84 Дж (из возможных под всей кривой 1,7 Дж), для образца Mou4 – 5,2 Дж (из возможных 9,8 Дж). Поскольку образец Mou3 нагружался с меньшей скоростью ударника, он не был полностью разрушен, но, как показал анализ рентгеновской томографии, был испещрен трещинами по всему объему. Другой образец фрагментировался полностью, проводился анализ статистики его фрагментации. Фрактолюминесценцию данных образцов зафиксировать не удалось, сигналы слабые, несмотря на объемное содержание кварцита в материале.

Динамическое нагружение цилиндрических образцов песчаника проводилось в интервале скоростей деформации 863-1447 $с^{-1}$ в интервале напряжений 603,8-44,8 МПа. Результаты обработки данных с регистрирующей аппаратуры установки «РСГ-25» приведены на рис.5, *б*. Оценена энергия нагружения образцов (как площадь под кривой «напряжение – деформация»): San1 – 2,3, San2 – 1,75, San3 – 8,3, San4 – 6,38 Дж. Все образцы были разрушены в режиме сохранения фрагментов (не менее 98 % от начальной массы образца).

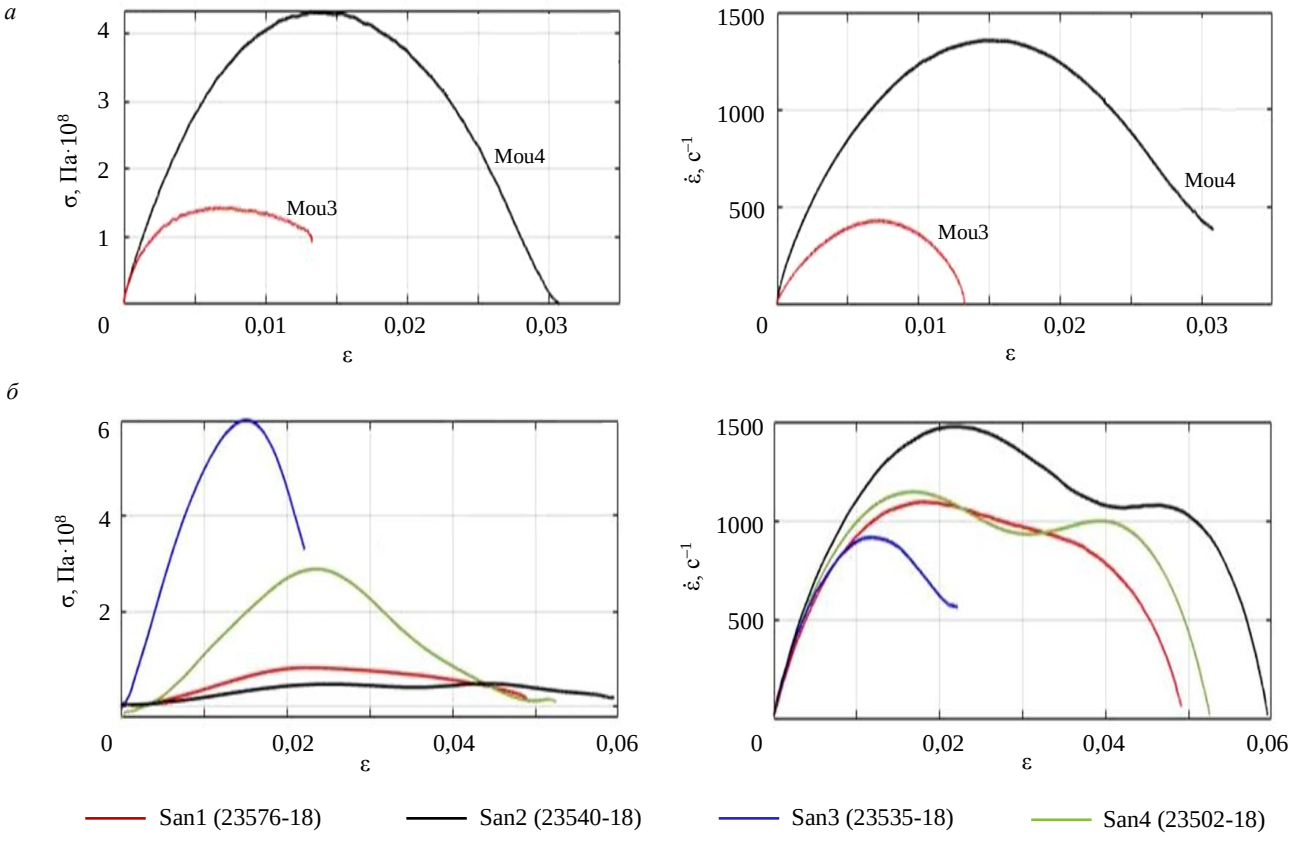


Рис.5. Изменение нагружающего напряжения и скорости деформации от значения деформации образцов андезита (*а*) и песчаника (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 77-90
© И.А.Банникова, С.В.Уваров, Д.В.Ефремов, М.В.Банников, 2025

Исследование образцов методом рентгеновской томографии. Для определения распространения трещин и образования поверхности разрушения проводились исследования образцов до и после испытаний на рентгеновском томографе Bruker (ИМСС УрО РАН, Пермь). На конечное разрушение материала оказывают влияние не только условия нагружения, но и свойства материала, дефекты (поры, трещины) до испытаний. В работе представлен анализ рентгеновской томографии некоторых образцов песчаника (San7 – образец из той же партии, что и San5, San6), андезита (Mou3, Mou4). До испытаний андезит и песчаник были неоднородными по составу, с вкраплениями материалов другого типа, что подтверждается результатами исследования состава материалов на электронном сканирующем микроскопе Hitachi S-3400N и рентгеноструктурного анализа. Также в образцах песчаника (рис.6, *а-в*), в отличие от андезита (рис.6, *г-е*), наблюдались трещины. В образцах присутствуют неоднородности одинаковой плотности, выделенные одним цветом на приведенных изображениях. После испытаний исследовались образцы, не полностью фрагментированные.

Несмотря на наличие или отсутствие небольших трещин в образцах песчаника его разрушение под действием квазистатического сжатия проходило по единому сценарию: накопление поврежденности по всему объему – формирование магистральных тещин по высоте образца и последующее разрушение (см. рис.4, *б*). Приведены некоторые фотографии сечений образца San5 в результате квазистатического сжатия (рис.**7**, *а*). Несмотря на то, что крупный фрагмент не разрушился, внутри него наблюдаются трещины по высоте всего объема образца. Основная поверхность разрушения крупного фрагмента образует форму песочных часов.

После динамического нагружения (при скорости ударника 9,8 м/с) в деформированном образце андезита Mou3 на рентгеновском томографе зафиксировали трещины по всему объему (рис.**7**, *б*). Несмотря на присутствие включений (белые и серые) в материале, трещины распространялись не по их границам, а сквозь них, что говорит о малой степени влияния этих включений на характер распространения трещин.

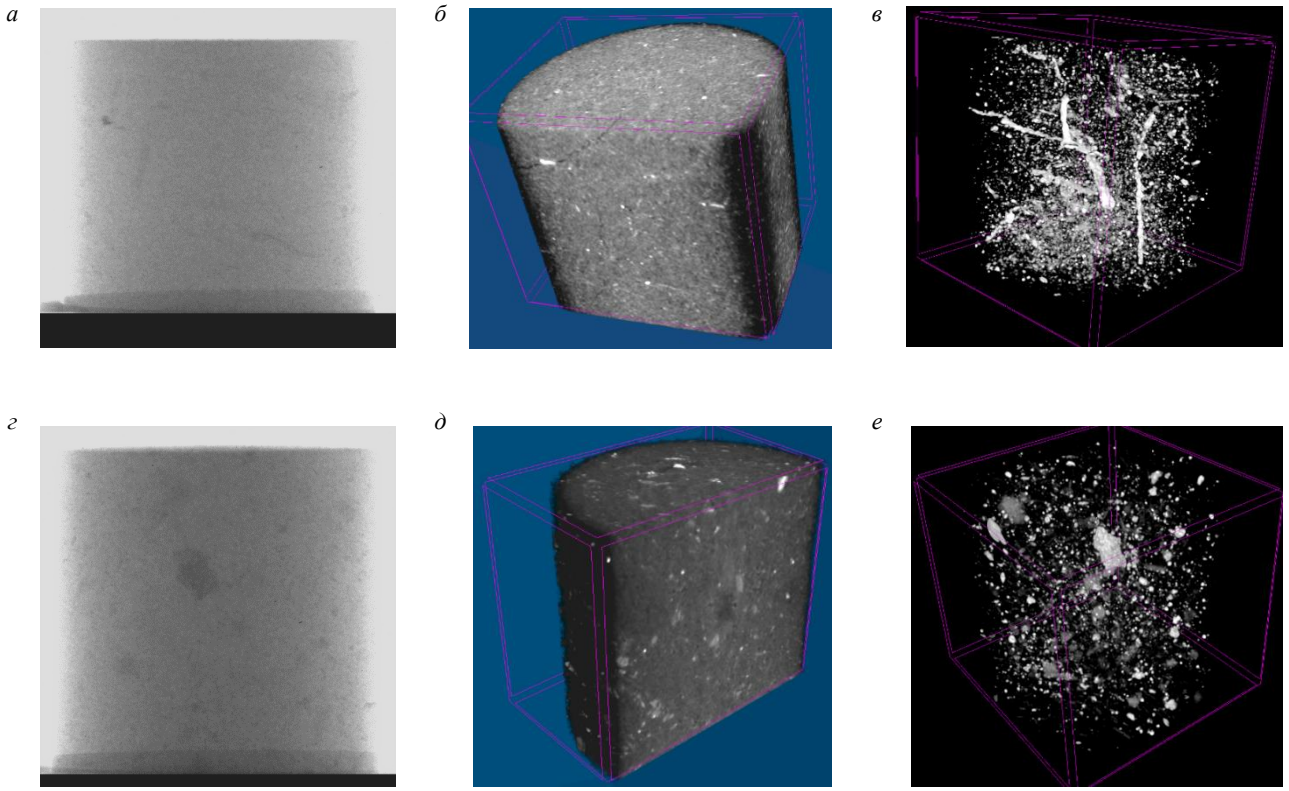


Рис.6. Результаты рентгеновской томографии до нагружения: внешний вид образцов песчаника (San7) и андезита (Mou4) (*а*, *г*); изображение их сечений (*б*, *д*) и 3D-изображения вкраплений в образцах – серые и белые области (*в*, *е*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

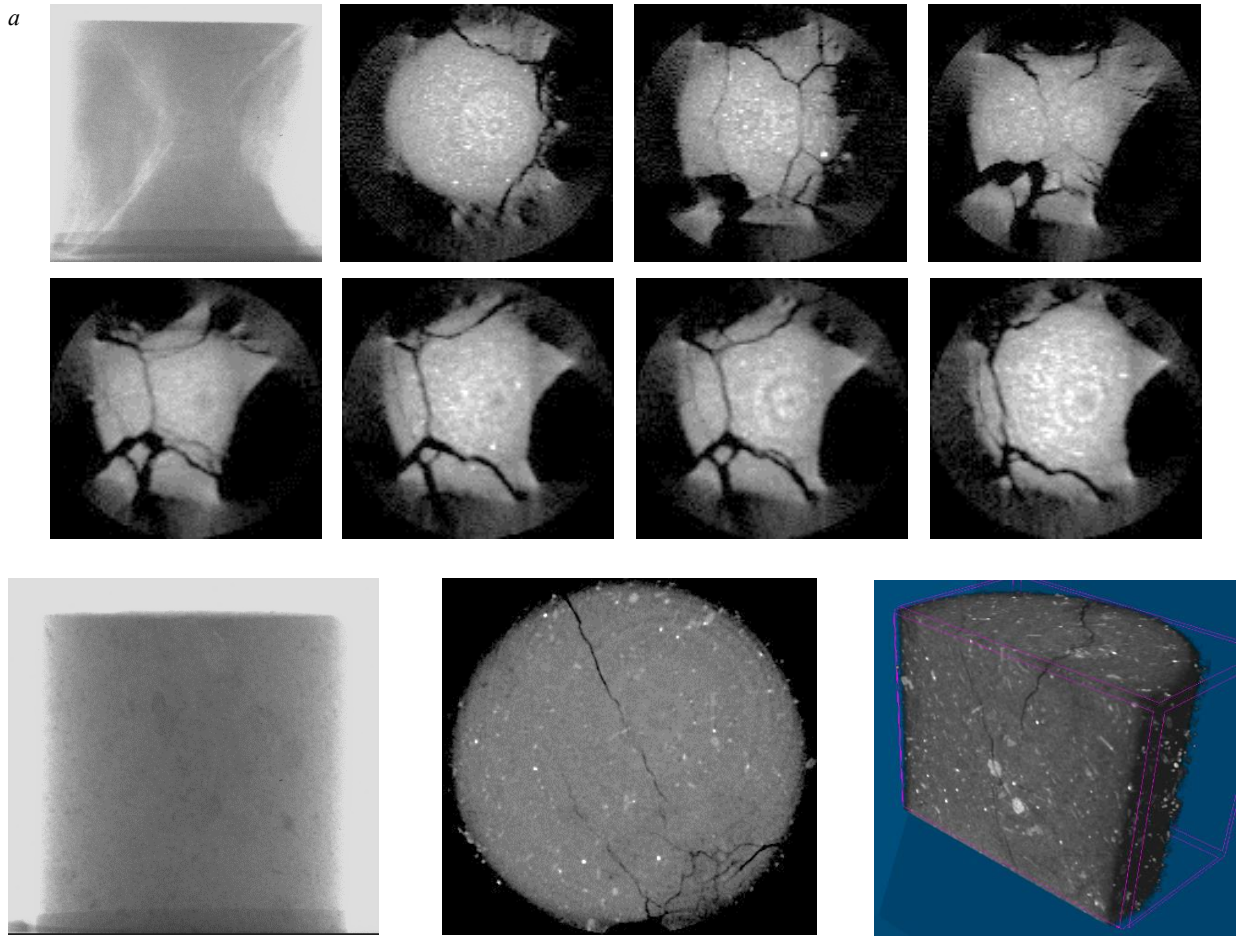


Рис.7. Результаты обработки данных рентгеновского томографа Bruker: *а* – фотографии образца песчаника San5 и его сечений по высоте с интервалом 1,5-2 мм после квазистатического сжатия; *б* – изображение образца андезита Mou3 после динамического сжатия (слева направо): вид сбоку, сечение по высоте вблизи верхнего основания, боковое сечение

Обсуждение результатов

Как показали результаты экспериментов и анализа данных, андезит состоит из твердой и мягкой фаз, поэтому размеры фрагментов соответствуют твердой фазе, а разрушение происходит по мягкой фазе. В таком материале происходит квазихрупкое разрушение. Песчаник является однородным материалом и состоит из прочных, слабо связанных между собой песчинок. Поэтому несмотря на то, что в образце формируются магистральные вертикальные трещины по всему объему образца, резкого падения несущей способности не наблюдается благодаря тому, что песчинки продолжают удерживаться вместе за счет сил трения в условиях сжатия. После снятия нагрузки образец рассыпается на фрагменты.

Предполагалось, что фазовый состав может повлиять на формирование трещин при квазистатическом и особенно при динамическом нагружении, для чего проводилась рентгеновская томография образцов до разрушения и после, а также при проведении эксперимента применялся метод DIC. Анализ андезита методом DIC показал, что разрушение проходит по границам вкраплений разных фаз, тогда как в песчанике при более однородном фазовом составе на последнем критическом этапе деформирования образуется одна магистральная и дочерние трещины (см. рис.4). Рентгеновская томография позволила увидеть, как магистральные трещины проходят в объеме образцов с неоднородным фазовым составом, и установить очаги поврежденности. Только после сопоставления данных DIC и томографии можно создать полную картину разрушения горной породы в процессе нагружения. Однако данных DIC недостаточно для однозначного вывода о процессе разрушения горных пород и характере развития поврежденности всего образца, поскольку места выхода трещин на поверхность образца (см. рис.4) не дают полной картины эксперимента, разрушения носят совершенно иной характер (рис.7).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение

Проведены испытания образцов горной породы (песчаник и андезит) под действием квазистатического и динамического нагружений в условиях сохранения фрагментов в широком интервале скоростей деформаций (10^{-3}-10^{3} $с^{-1}$). Часть экспериментов выполнялась с *in situ* регистрацией акустической эмиссии, фрактолюминесценции и DIC. Как показал анализ данных акустической эмиссии, DIC и томографии, на разрушение природных материалов влияют не только условия нагружения, но и характеристики исследуемого материала – плотность, дефектная структура (поры и трещины), элементный состав. Разрушение образцов при квазистатическом нагружении происходило в две стадии: накопление поврежденности (появление множества магистральных трещин) и последующее полное разрушение [35]. В случае динамического сжатия при достаточном значении энергии нагружающего импульса происходило полное фрагментирование образца, причем разрушение сопровождалось отрывом образовавшихся фрагментов.

Для получения полной картины необходимо сопоставить данные АЭ и DIC с результатами анализа статистики фрагментации горных пород и данных морфологии поверхности разрушения. Исследование акустической эмиссии при нагружении проводилось для последующего анализа стадийности процесса перехода от режима накопления поврежденности к макроскопическому нагружению материала. Для образцов андезита, исходя из энергии импульсов, выделяются две стадии (см. рис.3, *а*, *б*), когда на начальном этапе она почти не превышает пороговое значение, высокоэнергетические импульсы появляются при приближении к критической стадии. При этом при нагружении песчаника (см. рис.3, *в*, *г*) энергия сигналов акустической эмиссии остается на одном уровне, за исключением некоторых всплесков при формировании трещин скольжения. На графиках вероятности распределения энергии импульсов при нагружении андезита и песчаника (см. рис.3, *д*, *е*) можно увидеть точку перегиба, соответствующую переходу энергии импульсов АЭ от стадии накопления повреждений к критической стадии разрушения. Разделение стадий разрушения позволит обосновать методологию управляемой фрагментации в лабораторных условиях.

Полученные результаты используются при создании численных моделей разрушения горных пород. Эти модели учитывают многомасштабную кинетику зарождения и роста дефектов как критического явления (структурно-скейлинговые переходы). Возможно, в настоящее время количество испытанных образцов не позволяет сделать выводы о полной достоверности результатов, но в дальнейшем (с набором статистики) планируется использовать эти данные для оптимизации реальных процессов бурения.

Важным этапом является определение параметров модели на основе лабораторных экспериментов по фрагментации образцов породы в необходимом диапазоне интенсивностей нагружения. Статистические и кинетические закономерности фрагментации регистрируются с помощью независимых методов (распределение фрагментов по размерам (массе), кинетика сигналов фрактолюминесценции, акустической эмиссии). Методы обработки статистических распределений фрагментов по размерам и кинетике разрушения позволяют установить закономерности критичности. Оптимальными для реализации процессов бурения могут быть режимы, соответствующие множественной самоподдерживающейся фрагментации, которые определяются динамикой приложения нагрузки. Флуктуации сигналов акустической эмиссии можно связать с фрагментацией породы и образованием пластов при бурении.

Авторы выражают благодарность НТЦ «Газпромнефть» за предоставленные материалы, Пермскому государственному национальному исследовательскому университету (лаборатория электронной микроскопии) за предоставленное оборудование для исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Макаров П.В., Смолин И.Ю., Перышкин А.Ю. и др.* Экспериментальное и численное изучение катастрофической стадии разрушения горных пород и горных массивов // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 5. С. 43-55. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-15004

2. *Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Одинцев В.Н.* Фрагментация образцов углей при интенсивном динамическом воздействии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 6. С. 743-746. DOI: 10.1134/S0367676519060383

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Мартемьянов А.Н., Петров Ю.В.* Изучение динамического разрушения пород песчаника на основе критерия инкубационного времени // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 3. С. 162-172. DOI: 10.15372/PMTF20190317

4. *Xibing Li, Fengqiang Gong, Ming Tao et al.* Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Iss. 4. P. 767-782. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.04.004

5. *Hong-bo Du, Feng Dai, Yi Liu et al.* Dynamic response and failure mechanism of hydrostatically pressurized rocks subjected to high loading rate impacting // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020. Vol. 129. № 105927. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105927

6. *Yuan Xu, Feng Dai, Hongbo Du.* Experimental and numerical studies on compression-shear behaviors of brittle rocks subjected to combined static-dynamic loading // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 175. № 105520. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105520

7. *Нурхонов Х.А., Латипов З.Ё., Саидов К.А., Исломов М.А.* Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на параметры взрывных работ при проходке подземных горных выработок // Universum: технические науки. 2024. № 5-4 (122). С. 35-38.

8. *Заиров Ш.Ш., Каримов Ё.Л., Латипов З.Ё. и др.* Разработка способа взрывания горных пород с сохранением геологической структуры рудных тел // Universum: технические науки. 2023. № 12-4 (117). С. 17-21.

9. *Yang Ye, Thoeni K., Yawu Zeng et al.* Numerical Investigation of the Fragmentation Process in Marble Spheres Upon Dynamic Impact // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. Iss. 3. P. 1287-1304. DOI: 10.1007/s00603-019-01972-9

10. *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

11. *Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р. и др.* Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 231-245.

12. *Щербаков И.П., Чмель А.Е.* Конкурентное накопление повреждений внутри и между зерен при разрушении гранита при повышенных температурах // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 2084-2091. DOI: 10.15372/GiG20161110

13. *Yan Cheng, Lockner D., Duda M. et al.* Interlaboratory comparison of testing hydraulic, elastic, and failure properties in compression: lessons learned // Environmental Earth Sciences. 2023. Vol. 82. Iss. 21. № 509. DOI: 10.1007/s12665-023-11173-x

14. *Eremeyev V.A., Balandin Vl.Vas., Balandin Vl.Vl. et al.* Experimental study and numerical simulation of the dynamic penetration into dry clay // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2023. Vol. 35. Iss. 2. P. 457-469. DOI: 10.1007/s00161-023-01189-w

15. *Vinciguerra S.C., Greco A., Pluchino A. et al.* Acoustic Emissions in Rock Deformation and Failure: New Insights from Q-Statistical Analysis // Entropy. 2023. Vol. 25. Iss. 4. № 701. DOI: 10.3390/e25040701

16. *Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф.* Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 6. С. 915-923. DOI: 10.15372/GiG20170607

17. *Десятникова М.А., Игнатова О.Н., Раевский В.А., Целиков И.С.* Динамическая модель роста и схлопывания пор в жидкостях и твердых веществах // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 1. С. 115-122. DOI: 10.15372/FGV20170114

18. *Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагин В.А. и др.* Методы и средства определения динамической прочности воды // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. Т. 16 (3). С. 258-271.

19. *Okuma G., Maeda K., Yoshida S. et al.* Morphology of subsurface cracks in glass-ceramics induced by Vickers indentation observed by synchrotron X-ray multiscale tomography // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 6994. DOI: 10.1038/s41598-022-11084-0

20. *Давыдова М.М., Уваров С.В., Наймарк О.Б.* Пространственно-временная масштабная инвариантность при динамической фрагментации квазихрупких материалов // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 1. С. 100-107.

21. *Grady D.E.* Hugoniot equation of state and dynamic strength of boron carbide // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 117. Iss. 16. № 165904. DOI: 10.1063/1.4918604

22. *Roters F., Diehl M., Shanthraj P. et al.* DAMASK – The Düsseldorf Advanced Material Simulation Kit for modeling multi-physics crystal plasticity, thermal, and damage phenomena from the single crystal up to the component scale // Computational Materials Science. 2019. Vol. 158. P. 420-478. DOI: 10.1016/j.commatsci.2018.04.030

23. *Fengbo Han, Roters F., Raabe D.* Microstructure-based multiscale modeling of large strain plastic deformation by coupling a full-field crystal plasticity-spectral solver with an implicit finite element solver // International Journal of Plasticity. 2020. Vol. 125. P. 97-117. DOI: 10.1016/j.ijplas.2019.09.004

24. *Макеев А.И.* Формирование маршрута магистральной трещины разрушения в многоуровневой структуре конгломератных строительных композитов // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 119-131. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-109-5-119-131

25. *Valavi M., Casar Z., Mohamed A.K. et al.* Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 154. № 106712. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106712

26. *Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. и др.* Расчетно-экспериментальные исследования внутренних напряжений в строительных материалах // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 60-65. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10037

27. *Протосеня А.Г., Иовлев Г.А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139

28. *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

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

29. *Sakuma H., Lockner D.A., Solum J., Davatzes N.C.* Friction in clay-bearing faults increases with the ionic radius of interlayer cations // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. № 116. DOI: 10.1038/s43247-022-00444-3

30. *Katsuragi H.* Physics of Soft Impact and Cratering. Springer, 2016. 307 p. DOI: 10.1007/978-4-431-55648-0

31. *Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л.* Закономерности акустической эмиссии каменной соли при различных скоростях одноосного деформирования и температурном воздействии // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 3. С. 190-197. DOI: 10.15372/PMTF20200320

32. *Потокин А.С., Пак А.К.* Исследования акустической и электромагнитной эмиссий при одноосном сжатии образцов скальных горных пород // Наукосфера. 2020. № 11 (2). С. 86-91. DOI: 10.5281/zenodo.4309468

33. *Кульков Д.С., Имашев С.А.* Анализ сигналов акустической эмиссии в образцах геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова. 2019. № 2-1 (50). С. 274-280.

34. *Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В. и др.* Особенности проявления эффекта Кайзера при трехосном непропорциональном сжатии песчаника с переориентацией приложенных напряжений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2023. Т. 10. № 1. С. 69-76. DOI: 10.15372/FPVGN2023100110

35. *Bannikova I.A., Uvarov S.V., Chudinov V.V., Naimark O.B.* Scaling laws in fragmentation dynamics of ceramics and natural materials // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 47. P. 602-607. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.063

36. *Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б. и др.* Особенности локализации деформации при растяжении сильвинита // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 127-138. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.08

37. *Ударцев А.А.* Анализ полей деформаций методом корреляции цифровых изображений образцов горных пород с дефектом при одноосном сжатии // Горное эхо. 2019. № 3 (76). С. 34-37. DOI: 10.7242/echo.2019.3.9

***Авторы*: Ирина Анатольевна Банникова,** *канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник* (*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*), *malgacheva@icmm.ru, https://orcid.org/0000-0002-1344-1265*, **Сергей Витальевич Уваров,** *канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник* (*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-7538-0971*, **Денис Викторович Ефремов,** *инженер* (*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-6509-1228*, **Михаил Владимирович Банников,** *канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник* (*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-5737-1422*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0