14

Особенности развития магистральной трещины в природном гетерогенном материале при его механическом нагружении, выявленные с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии

© Е.Е. Дамаскинская [1], В.Л. Гиляров [1], Ю.С. Кривоносов [2], А.В. Бузмаков [2], В.Е. Асадчиков [2], Д.И. Фролов [1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
Москва, Россия

E-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 октября 2025 г.
В окончательной редакции 23 октября 2025 г.
Принята к публикации 26 октября 2025 г.

Целью работы являлось проведение прямого наблюдения и анализ морфологических особенностей магистральной трещины, развивающейся в образцах природных гетерогенных материалов при механическом воздействии. Для детектирования дефектов в объеме использовалась рентгеновская компьютерная микротомография. Особенность экспериментов состояла в том, что выполнялась томографическая съемка образца, находящегося под действием нагрузки. На основе анализа томографических сечений построены трехмерные модели дефектной структуры, вычислены фрактальная размерность и относительный объем системы микротрещин.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, эволюция магистральной трещины, фрактальная размерность, относительный объем дефектов.

DOI: 10.61011/FTT.2026.02.62726.293-25

1. Введение

Многочисленные экспериментальные исследования, в которых проводилось деформирование хрупких структурно-неоднородных материалов как естественного, так и искусственного происхождения свидетельствуют [1–8] о наличии ряда последовательных стадий процесса разрушения. Заключительной стадией является развитие магистральной трещины.

Данная работа посвящена исследованию развития магистральной трещины в образцах природных гетерогенных материалов под действием одноосной сжимающей нагрузки. В качестве метода выбрана рентгеновская компьютерная микротомография. Данный метод позволяет наблюдать дефекты в объеме непрозрачного материала, и, что важно, проводить дальнейший анализ параметров этих дефектов.

В последнее время компьютерная томография получила широкое распространение при исследовании микротрещин, образовавшихся в результате механического воздействия. Как правило, томографическая съемка выполняется либо после завершения механических испытаний, либо после каждого этапа нагружения [9–12]. При этом в процессе томографической съемки образец находится в ненагруженном состоянии. В [13,14] описаны эксперименты, в которых проводились томографические исследования образцов, находящихся в нагруженном состоянии. Наблюдалось развитие системы трещин по мере увеличения нагрузки. Однако количественных оценок параметров трещин не выполнялось.

Задача настоящей работы состоит в проведении прямого наблюдения и анализе морфологических особенностей магистральной трещины, развивающейся в объёме образцов природных гетерогенных материалов. Отличительной особенностью работы является то, что на протяжении всего эксперимента образец находится под действием нагрузки.

2. Эксперимент

В качестве материала был выбран гранит Westerly, который часто используется в экспериментах по деформированию горных пород [1,15,16]. Однако прямых наблюдений и визуализации развития магистральной трещины, а также определения ее морфологических параметров, ранее выполнено не было. Минеральный состав гранита Westerly приведен в таблице.

Торцы образцов дополнительно шлифовались для обеспечения их плоскопараллельности. Боковая поверхность образцов перед экспериментами фиксировалась с помощью термоусадочного материала для предотвращения рассыпания в процессе деформирования. Образцы изготавливались в виде цилиндров диаметром 7 mm и высотой 14 mm.

Минеральный состав гранита Westerly

Минерал	Кварц (Quartz)	Плагиоклаз (Plagioglase)	Полевой шпат (K-Feldspar)	Биотит (Biotite)	Мусковит (Muscovite)
	28 %	33 %	33 %	3.5 %	1.9 %
Плотность, kg/m^3	2600–2650	2620–2760	2560	2800–3400	2760–3100

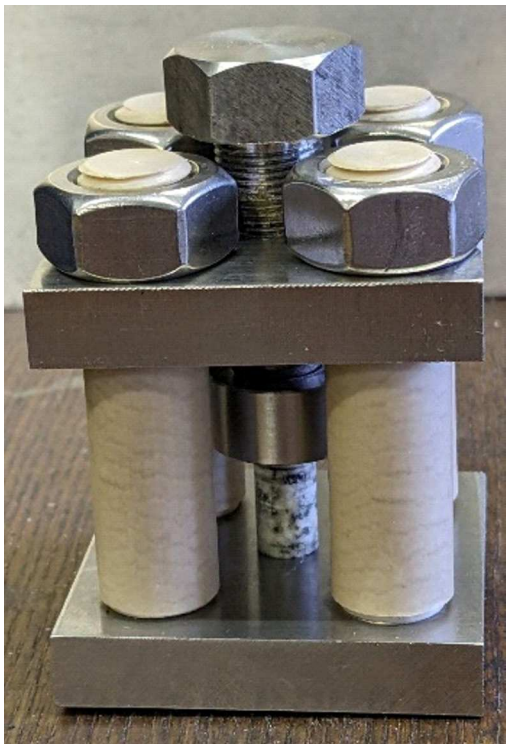

Рис. 1. Фото переносного нагрузочного устройства с установленным образцом.

Чтобы проследить распространение магистральной трещины (системы трещин), необходимо выполнять томографическую съемку образца, находящегося под действием нагрузки. Было разработано специальное переносное нагрузочное устройство (см. рис. 1), которое обеспечивает необходимую нагрузку, помещается в камеру томографа и не препятствует измерению (подробно описано в [17]).

Нагрузка осуществляется путем поворота винта. С помощью электронного динамометрического ключа измеряется крутящий момент (который в дальнейшем пересчитывается в нагрузку).

Томографические измерения были выполнены на конусно-лучевом рентгеновском микротомографе „МИКРОТОМ“, разработанном и созданном в НИЦ „Курчатовский институт“ [18]. В томографе используется микрофокусный полихроматический рентгеновский источник с прострельным анодом из молибдена и размером фокусного пятна 15–20 μm. Для эксперимента было выбрано ускоряющее напряжение 80 kV. Томографические проекции образца регистрировались рентгеновским детектором XIMEA с матрицей размером 2968×5056 элементов и размером пикселя 8.5 μm. Серию томографических экспериментов на всех стадиях разрушения образца проводили в единой геометрии: расстояние источник–образец 50 mm и источник–детектор 200 mm, геометрическое увеличение $M = 4.0$. В каждом эксперименте регистрировали 720 проекций в диапазоне углов 360°. Восстановление трехмерных изображений объектов выполняли с помощью алгоритма FDK [19]. Чтобы уменьшить „эффект чаши“, который является артефактом и возникает вследствие „ужесточения“ полихроматического пучка при прохождении через образец, между источником и образцом устанавливали Cu-фильтр толщиной 0.05 mm. Кроме этого, для полного устранения чашевидного артефакта к исходным нормированным и логарифмированным синограммам применяли процедуру автоматической гамма-коррекции, описанной в работе [20]. Также отметим, что с учетом предложенной геометрии эксперимента томография образца была сделана не для всего образца целиком, а для его центральной части высотой 6 mm.

3. Результаты и обсуждение

В проведенных экспериментах контраст связан с поглощением рентгеновских лучей при прохождении через объект исследования. Поскольку материал образца является неоднородным, коэффициенты поглощения различных компонентов отличаются. В результате, после томографической реконструкции получаются картины распределения рентгенооптической плотности, которой соответствуют градации серого, в различных горизонтальных сечениях образца.

Эксперимент проходил в несколько этапов. Нагрузку на образец постепенно увеличивали с шагом 0.5 kN. После каждого изменения нагрузки выполняли томографическую съемку. Примеры томографических срезов на одной и той же высоте образца показаны на рис. 2. Вплоть до нагрузки $F = 9$ kN трещин обнаружено не было. Когда нагрузка достигла 9 kN, в образце были обнаружены микротрещины. Томографические срезы, соответствующие этой нагрузке показаны на рис. 2, *b*. Затем образец сутки находился под действием нагрузки 9 kN. На следующем этапе при повороте винта нагрузочного устройства удалось достичь только нагрузки

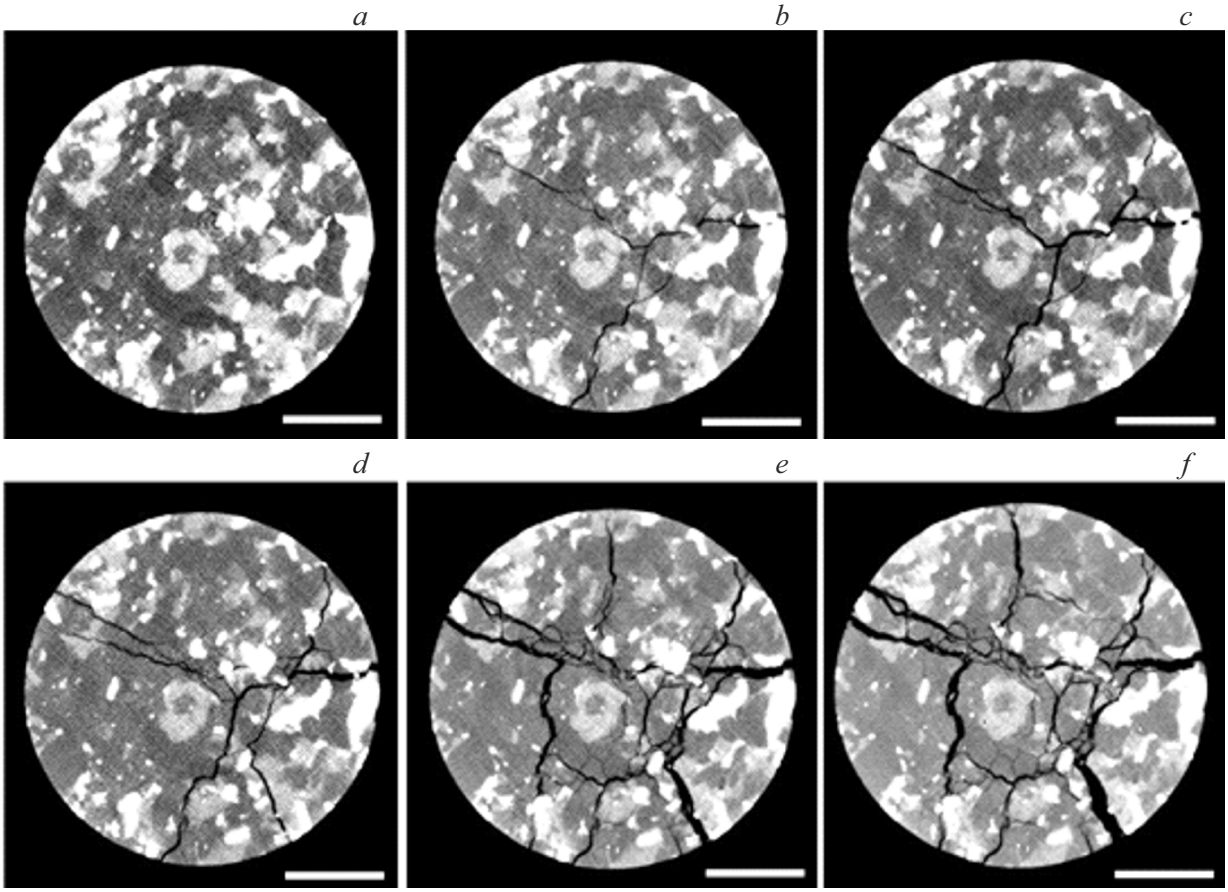

Рис. 2. Томографические сечения образца в градациях серого: *a*) исходный образец; *b, c, d, e, f*) образец после каждого этапа нагружения. Длина штриха равна 2 mm.

8.1 kN, поскольку при этой нагрузке образец стал интенсивно разрушаться. Мы полагаем, что образование трещин привело к релаксации напряжений в материале. Именно поэтому дальнейшее развитие дефектной структуры (распространение трещин и образование новых) произошло при более низких нагрузках. Эта гипотеза полностью подтверждается данными томографических исследований образца. На рис. 2, *c* показаны томографические срезы, полученные при нагрузке 8.1 kN. Видно, что система трещин стала более разветвленной; кроме того, появились трещины, которых не было на предыдущем этапе нагружения.

Далее по такой же схеме было выполнено еще 3 этапа нагружения (7.1, 5.9 и 2.7 kN). Еще раз подчеркнем, что в проведенном эксперимента на каждом последующем этапе разрушения уменьшалась нагрузка, прикладываемая к образцу. Примеры томографических срезов, полученных при этих нагрузках, показаны на рис. 2, *d–f*. Таким образом, отчетливо прослеживается эволюция системы трещин, которые образуют магистральную трещину.

Для количественного анализа морфологии системы трещин вычислялись фрактальная размерность и относительный объем трещин.

Фрактальная размерность вычислялась методом box counting (BCM) [12,21,22]. Строилась зависимость числа кубов, которые располагаются на границе материал–трещина, от длины стороны куба. Полученная зависимость аппроксимировалась степенным законом, показатель степени давал оценку фрактальной размерности. По существу, это размерность D_0 из набора фрактальных размерностей Реньи [23]. Применив этот метод, мы рассчитали фрактальную размерность поверхностей трещин на основе трехмерных моделей реконструкции трещин. Видно, что фрактальная размерность системы трещин постепенно увеличивается (рис. 3, *a*). На первой стадии фрактальная размерность равна 2.06, т.е. трещина практически плоская. На финальной стадии форма трещины становится более „объемной“, фрактальная размерность достигает значения2.38.

Еще один количественный параметр, характеризующий трещину — относительный объем. Видно, что этот параметр также растет от 1.1 % до 14.1 % (рис. 3, *b*).

Увеличение фрактальной размерности и относительного объема трещин указывает на то, что система трещин становится более разветвленной, занимая все больший объем. Это наглядно иллюстрирует трехмерная

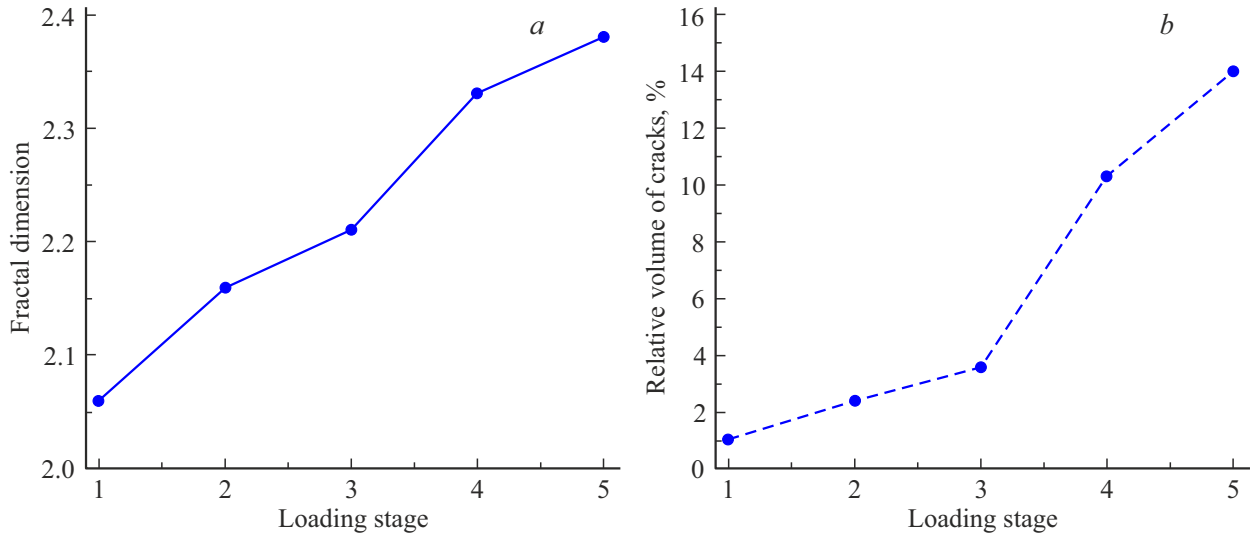

Рис. 3. Значения *a*) фрактальной размерности и *b*) относительного объема трещин во всей исследуемой части образца на каждой стадии нагружения.

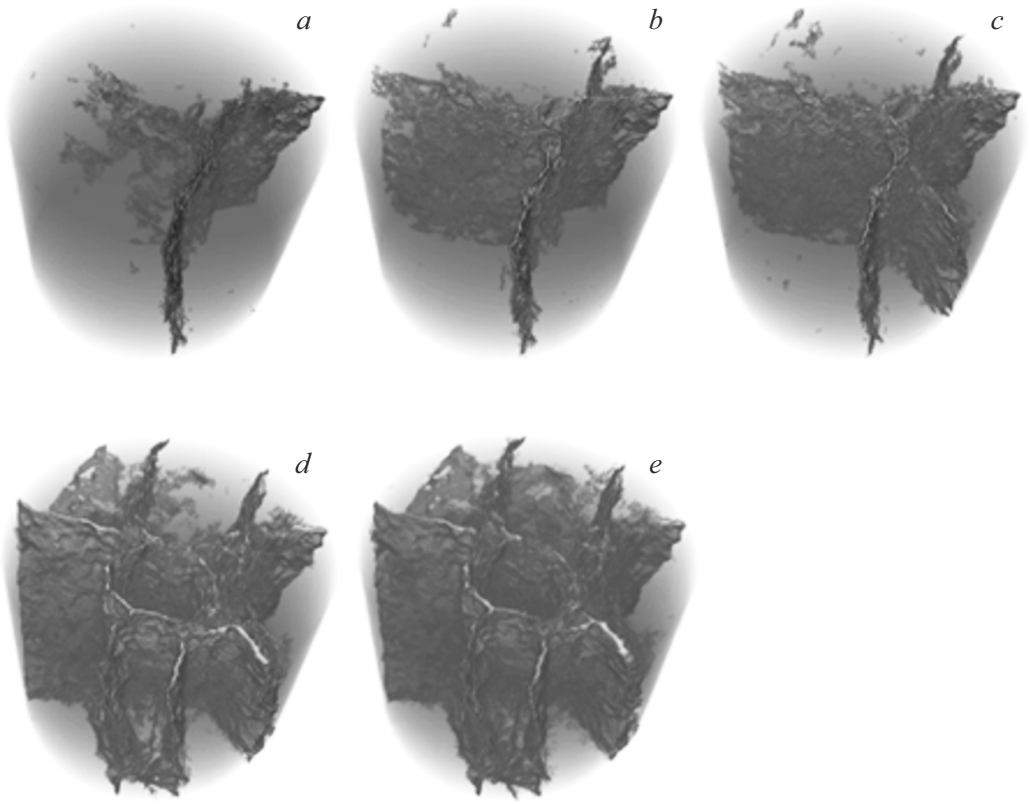

Рис. 4. Трехмерная визуализация системы микротрещин на каждом из 5 этапов нагружения: *a*–*e* Темно-серые объекты сложной геометрической формы внутри образца — образовавшаяся трещина.

визуализация системы микротрещин, построенная по результатам томографии (рис. 4).

Далее был проведен детальный анализ изменения фрактальной размерности и относительного объема в различных частях исследуемой области образца на каждой стадии нагружения. Для этого весь массив данных разбивался на 6 частей по высоте образца. Высота каждой части составляла 0.935 mm (147 томографических срезов). Изменение этих параметров показано на рис. 5. Видно, что на первых трех стадиях фрактальная раз-

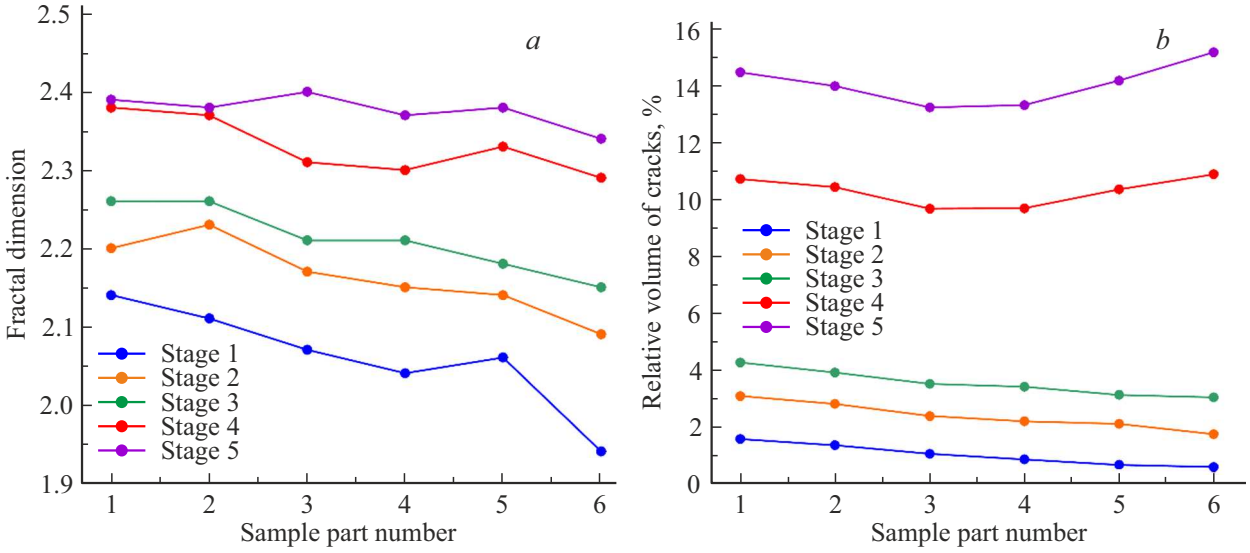

Рис. 5. Изменение *a*) фрактальной размерности и *b*) относительного объема трещин в отдельных частях образца на каждой стадии нагружения.

мерность варьируется по высоте образца (трещина формируется по-разному в разных областях). На последних стадиях фрактальная размерность значительно выросла и стала практически одинаковой по всему образцу. Относительный объем трещин на каждой стадии демонстрирует малую вариабельность по высоте образца. Наблюдается существенное увеличение относительного объема на последних двух стадиях.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что система трещин постепенно становится более „объемной“ (достигая среднего по образцу значения фрактальной размерности 2.38), увеличивается относительный объем трещин.

4. Заключение

Исследовано изменение морфологии магистральной трещины в образце гранита Westerly при его механическом нагружении. Непосредственное наблюдение дефектов в непрозрачном образце, находящемся под действием нагрузки, выполнено с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии. На основе анализа томографических срезов вычислены фрактальная размерность и относительная объемная доля системы трещин на пяти этапах нагружения. Установлено, что оба параметра увеличиваются по мере развития дефектной структуры. Это показывает, что система микротрещин становится более развитой и постепенно занимает все больший объем. Данный вывод иллюстрируют построенные трехмерные модели дефектной структуры.

Финансирование работы

В части постановки задачи и анализа результатов работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“ в части проведения томографических экспериментов и в рамках Соглашения № 075-15-2025-458 с Министерством науки и высшего образования РФ в части математической обработки томографических данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] D.A. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin. Nature **350**, *6313*, 39 (1991).
[2] Л.Р. Ботвина. Физика Земли **10**, 5 (2011).
[3] M. Petružálek, J. Vilhelm, V. Rudajev, T. Lokajíček, T. Svitek. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. **60**, 208 (2013).
[4] Y. Hamiel, O. Katz, V. Lyakhovsky, Z. Reches, Yu. Fialko. Geophys. J. Int. **167**, 1005 (2006).
[5] V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaya, D. Lockner. Pure Appl. Geophys. **146**, *2*, 253 (1996).
[6] В.Б. Смирнов, А.В. Пономарев, П. Бернар, А.В. Патонин. Физика Земли **2**, 17 (2010).
[7] X. Lei, S. Ma. Earthq. Sci. **27**, *6*, 627 (2014).
[8] Y. Tal, T. Goebel, J.P. Avouac. Earth & Planetary Sci. Lett. **536**, 116133 (2020).
[9] S.-Q. Yang, P.G. Ranjith, Y.-L. Gui. Geotech. Test. J. **38**, *2*, 179 (2015).
[10] S. Zabler, A. Rack, I. Manke, K. Thermann, J. Tiedemann, N. Harthill, H. Riesemeier. J. Structural Geology. **30**, *7*, 876 (2008).
[11] Y. Zuo, Z. Hao, H. Liu, C. Pan, J. Lin, Z. Zhu, W. Sun, Z. Liu. Arab. J. Geosci. **15**, *22*, 1673 (2022).

[12] Y. Yang, Y. Ju, F. Li, F. Gao, H. Sun. J. Natural Gas Sci. Eng. **32**, 415 (2016).
[13] X.P. Zhou, Y.X. Zhang, Q.L. Ha. Theor. Appl. Fracture Mechanics **50**, *1*, 49 (2008).
[14] J.X. Ren. Soil and Rock Behavior and Modeling. https://doi.org/10.1061/40862(194)34
[15] J. Tullis, R.A. Yund. J. Geophys. Res. **82**, *36*, 5705 (1977).
[16] R.M. Stesky. Can. J. Earth. Sci. **15**, *3*, 361 (1978).
[17] Е.Е. Дамаскинская, В.Л. Гиляров, Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, В.Е. Асадчиков, Д.И. Фролов. ФТТ **66**, *9*, 1623 (2024).
[18] Ю.С. Кривоносов, А.В. Бузмаков, М.Ю. Григорьев, А.А. Русаков, Ю.М. Дымшиц, В.Е. Асадчиков. Кристаллография **68**, *1*, 160 (2023).
[19] L.A. Feldkamp, L.C. Davis, J.W. Kress. J. Opt. Soc. Am. A **1**, *6*, 612 (1984).
[20] A.S. Ingacheva, M.V. Chukalina. Math. Problems. Eng. ID 1405365 (2019).
[21] Y. Ju, J. Zheng, M. Epstein, L. Sudak, J. Wang, X. Zhao. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. **279**, *7*, 212 (2014).
[22] H.P. Xie. Fractals in Rock Mechanics. CRC PRESS, Boca Raton (1993). 464 pp.
[23] R.D. Peng, Y.C. Yang, Y. Ju, L.T. Mao, Y.M. Yang. Chinese Sci Bull. **56**, *31*, 3346 (2011).

Редактор Е.В. Толстякова