

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ДИАБАЗА С ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

А. А. Галунин¹, Г. Д. Степанов¹, В. И. Безруков¹, П. Свобода², А. Н. Кравцов²

¹ Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»
Горный институт, Москва, Россия

² Чешский технический университет в Праге, Чешская Республика

Аннотация: Проведены исследования внутренней структуры образцов диабазов вскрышных пород Павловского месторождения. Выполнены петрографический и элементный анализы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Определены физико-механические параметры образцов, включающие предел прочности при одноосном сжатии и растяжении, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Внутренняя структура и ее особенности изучались методами рентгеновской и лазерно-ультразвуковой томографии. Использовался рентгеновский томограф SkyScan фирмы Bruker с источником рентгеновского излучения 130 кВ и плоским детектором. Максимальный размер объекта исследования составлял 140 мм, разрешение – не хуже 20 мкм. Построены изображения внутренней структуры образцов диабаз. Измерены закрытая пористость, значения которой лежали в диапазоне от 0,01 до 1,38 %, и открытая – со значениями от 0,32 до 0,48 %. Получены изображения внутренней структуры образцов диабазов с использованием лазерного ультразвукового томографа с многоканальной оптико-акустической антенной. Приведены изображения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Определены геометрические параметры внутренних дефектов, таких как разуплотнения между зернами в виде трещин протяженностью около 200–300 мкм. Показана возможность определения динамических упругих модулей на основе прецизионного измерения скоростей упругих волн.

Ключевые слова: керн, диабаз, рентгеновская томография, лазерно-ультразвуковая томография, внутренняя структура, электронная микроскопия, пористость, физико-механические свойства.

Для цитирования: Галунин А. А., Степанов Г. Д., Безруков В. И., Свобода П., Кравцов А. Н. Исследование внутренней структуры образцов диабаз с помощью оптико-акустической и компьютерной рентгеновской томографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4-1. – С. 16–25. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.

Research of the internal structure of diabase samples by optical-acoustic and computer x-ray tomography

A. A. Galunin¹, G. D. Stepanov¹, V. I. Bezrukov¹, P. Svoboda², A. N. Kravcov²

¹ National Research Technological University "MISIS" Mining Institute, Moscow, Russia

² Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

Abstract: The paper examines the internal structure of overburden diabase specimens from the Pavlovskoye ore deposit. Petrographic and elemental analyzes were performed using a scanning electron microscope. The physical and mechanical parameters of the specimens were evaluated, including the ultimate uniaxial compressive strength, the ultimate tension strength, the modulus of elasticity, and Poisson's ratio. The internal structure of the specimens was examined with X-ray and laser-ultrasonic tomography. We used a Bruker SkyScan tomograph with an X-ray source of 130 kV and a flat detector. The maximum size of the object under study was 140 mm, the resolution was not worse than 20 μm . The closed porosity was estimated, ranging from 0.01 to 1.38 %; the open porosity was from 0.32 to 0.48 %. Images of the internal structure of the diabase specimens were produced by a laser ultrasonic tomograph with a multichannel optoacoustic antenna. The images are given in three mutually perpendicular planes. We determined the geometry of internal defects, such as cracks about 200–300 microns long, related to decompaction between grains. It is shown that the dynamic elastic moduli can be determined from precise elastic wave velocity measurements.

Key words: core, diabase, X-ray tomography, laser-ultrasound tomography, internal structure, electron microscopy, porosity, physical and mechanical properties.

For citation: Galunin A. A., Stepanov G. D., Bezrukov V. I., Svoboda P., Kravcov A. N. Research of the internal structure of diabase samples by optical-acoustic and computer x-ray tomography. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):16–25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.

Введение

Основную информацию о структуре и свойствах горных пород получают при исследовании зерна. Для данных исследований необходимо применение комплексного подхода с привлечением технологий, обеспечивающих максимальную сохранность зерна и информативность полученных данных.

В настоящее время для максимально информативного изучения зерна применяют набор методов, включающий петрографическое изучение шлифов [1–2], электронную микроскопию [3–4], ультразвуковые методы [5], рентгеновскую томографию [6–8], комплекс механических испытаний [9–10] и др. [11].

Метод компьютерной рентгеновской томографии является наиболее информативным при изучении структурных особенностей образцов горной породы [12]. Он позволяет исследовать внутренние части объекта в их естественной ориентации с целью определения морфоструктурных характеристик. Одним из преимуществ является простота подготовки образцов для данного

метода изучения, когда нет необходимости изготавливать полированные шлифы.

С другой стороны, метод компьютерной рентгеновской томографии имеет ряд недостатков. Первым недостатком является ограничение по размерам зерна. Для получения разрешения 5 мкм диаметр зерна не должен превышать 15 мм. Исследование полно-размерного зерна возможно с разрешением порядка 50 мкм и более. Вторым недостатком является ограничение, связанное с интегральной толщиной объекта вдоль прямой по любому из направлений плоскости сечения. Кроме этого, рентгеновская томография не дает информации о средах с сильными магнитными свойствами и о структурных компонентах с близкими значениями плотностей.

Ультразвуковые методы более чувствительны к элементам с одинаковыми плотностями, поскольку идентификация структурных элементов базируется на различиях в акустических импедансах. В первую очередь, к таким методам, помимо традиционных ульт-

тразвуковых, относятся акустическая микроскопия [13] и лазерная ультразвуковая структуроскопия [14–16].

Метод акустической микроскопии характеризуется диапазоном частот от 50 МГц до 3 ГГц, а в качестве иммерсионной жидкости используется вода. В таком случае можно добиться разрешения от 20 мкм до 0,5 мкм. Акустическая микроскопия позволяет непосредственно наблюдать микроструктуру объекта, распределение его упругих и вязких свойств, используется для получения изображений оптически непрозрачных объектов или прозрачных объектов с незначительным оптическим контрастом. Однако в связи с сильным затуханием ультразвуковых волн на данных частотах возможная глубина диагностики структуры и свойств образцов не превосходит десятков микрон.

Основным отличием лазерно-ультразвуковой структуроскопии является возбуждение сверхкоротких ультразвуковых импульсов с помощью лазера и прием рассеянных и отраженных сигналов широкополосным пьезоприемником с малой апертурой [17]. Поскольку амплитуда давления таких импульсов может достигать 0,1 МПа, а их частотный диапазон составляет 300 кГц – 30 МГц при их пространственной протяженности менее 0,2 мм, то толщина исследуемых образцов геоматериалов может достигать нескольких сантиметров при площади поперечного сечения до метра при высоком пространственном разрешении.

Стоит упомянуть, что с помощью метода лазерно-ультразвуковой структуроскопии можно не только изучить нарушенность образцов геоматериала, но и по измеренным скоростям продольных и поперечных волн погрешностью порядка 0,1 % рассчитать локальные модули упругости (коэффици-

циент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига).

В данной работе для изучения структурных особенностей диабазов использовались методы электронной микроскопии, компьютерной рентгеновской томографии и оптико-акустической томографии.

Методы и материалы

Основным объектом изучения являлись диабазы, присутствующие во вскрышных породах Павловского месторождения свинцово-цинковых руд. Физико-механические свойства данных пород исследовались на кернах диаметром 63 мм, полученных с глубин порядка 10–15 м. Для рентгеновской и оптико-акустической (или лазерно-ультразвуковой) томографии были подготовлены образцы кубической и призматической формы с размерами 10x10x10 мм, 10x10x20 мм, 19x19x38 мм.

Петрографический и элементный анализы были выполнены при изучении аншлифов на электронном микроскопе PhenomProX, два из которых представлены на рис. 1, 2. Было установлено, что образцы в среднем содержат до 51–55 % плагиоклаза, 17–21 % пироксена, 5 % оливина, а также другие минеральные метаморфические примеси (рис. 1, 2). Элементарный состав для нескольких точек, отмеченных на рис. 1, 2, приведен в табл. 1.

При проведении электронной микроскопии было выявлено, что большинство образцов диабазов содержат трещины, среднее значение раскрытия которых составило 2 мкм, а их протяженности имели порядок 50–100 мкм.

Для изучения основных физико-механических свойств, таких как предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ и растяжении $\sigma_{\text{р}}$, продольной и поперечной деформации при нагрузке,

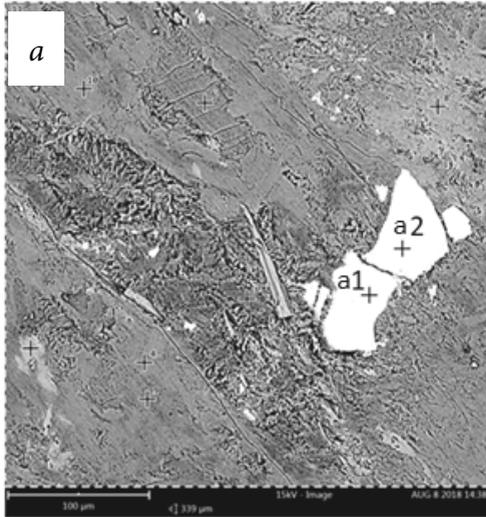


Рис. 1. Фотография поверхности области А образца диабазы при 500-кратном увеличении

Fig. 1. Photograph of surface area A of a diabase sample at 500x magnification

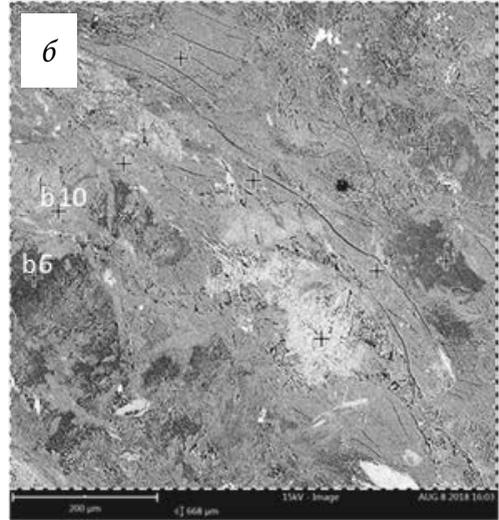


Рис. 2. Фотография поверхности области В образца диабазы при 500-кратном увеличении

Fig. 2. Photograph of surface area B of a diabase sample at 500x magnification

Таблица 1

Элементарный состав для четырех точек областей А и В
Elementary composition for four points of regions A and B

Номер точки	Элемент	Концентрация, %	Вероятность ошибки	Номер точки	Элемент	Концентрация, %	Вероятность ошибки
a1	O	40,5	0,4	b6	Si	21,6	0,2
	Ti	1,2	0,0		O	47,8	0,3
	Fe	21,4	0,1		Mg	14,7	0,3
	Si	5,1	0,1		Al	1,6	0,6
	Mg	5,0	0,4		Fe	4,1	0,2
	Al	1,7	0,2		Na	1,1	1,1
	C	5,7	2,1		C	8,7	1,8
	Mn	1,8	0,0		Ca	0,1	1,2
a2	Ti	23,6	0,0	b10	O	49,1	0,4
	Fe	28,6	0,1		Si	12,9	0,2
	O	35,3	0,4		Mg	13,0	0,3
	Si	1,1	0,4		Al	8,0	0,1
	C	7,0	0,7		Fe	11,5	0,1
	Mn	2,8	0,0		Na	0,9	0,3
	Mg	0,9	0,2		C	4,4	0,5

использовались испытательный пресс с максимальной нагрузкой 1500 кН и тензометрический комплекс. По соответствующим деформационным кривым определялись коэффициент Пуассона (μ) и Юнга (E). Средние значения перечисленных выше параметров приведены в табл. 2, где ρ — плотность образцов.

Внутренняя структура и ее особенности изучались методами рентгеновской и лазерно-ультразвуковой томографии. Использовался томограф SkyScan фирмы Bruker с источником рентгеновского излучения 130 кВ и плоским детектором. Максимальный размер объекта исследования составлял 140 мм, разрешение — не хуже 20 мкм [18].

Также структура вышеупомянутых образцов оценивалась с помощью

лазерно-ультразвукового томографа, принцип работы которого заключался в следующем. Наносекундный импульс лазера с диодной накачкой направляется на оптико-акустический генератор и поглощается в нем. Последующее термоупругое расширение нагретой области генератора приводит к возбуждению субмикросекундного ультразвукового зондирующего импульса с плоским волновым фронтом. Эта волна фокусируется акустической линзой для сужения области зондирования и формирования плоскости изображения шириной менее 500 мкм. Решетка пьезоэлектрических детекторов регистрирует акустические волны, отраженные от внутренних дефектов или других акустических неоднородностей образца. Полученные сигналы исполь-

Таблица 2

Статические физико-механические свойства образцов диабазов
Static mechanical properties of diabase samples

Образец	ρ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$ ср, МПа	σ_p ср, МПа	E , ГПа	μ
Диабаз	2940	125,4	11,9	56,2	0,15

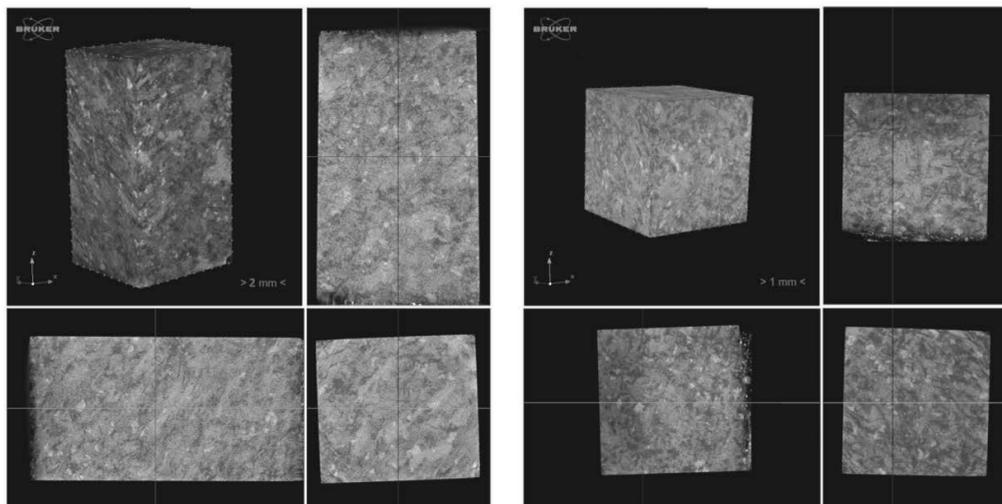


Рис. 3. 3D изображения (и отдельные сечения) структуры образцов размерами 19x19x38 мм и 10x10x10 мм, полученные на рентгеновском томографе

Fig. 3. 3D images (and individual sections) of the structure of samples with dimensions of 19x19x38 mm and 10x10x10 mm, obtained on x-ray tomography

зуются для построения двумерного изображения, называемого лазерно-ультразвуковой томограммой. Разработанный метод обеспечивает высокое разрешение благодаря сочетанию преимуществ лазерного возбуждения ультразвука, детектирования решеткой приемников и томографическому подходу к восстановлению изображений образца [19].

Результаты

Результатами проведения интроскопических исследований с помощью перечисленных выше методов являлись томограммы внутренней структуры и выходные данные о морфометрических характеристиках образцов, полученных с помощью программных алгоритмов. Рентгеновское изображение образцов и сечения приведены на рис. 3.

Основными определяемыми с помощью рентгеновской томографии параметрами являлись закрытая и открытая пористость, численные значения которой приведены в табл. 3.

Аналогично компьютерной рентгеновской томографии были получены изображения внутренней структуры образцов диабазов с использованием лазерной ультразвуковой томографии. Схема расположения отдельных сечений, в которых формировалось изображение, приведена на рис. 4.

На рис. 5 представлены три сечения XY, YZ, XZ образца диабаз. На сечении YZ показаны области 1, 2, 3. Область № 1 соответствует поверхности образца, область № 2 — внутренним включениям, таким как разуплотнения между зернами в виде трещин протяженностью около 200–300 мкм. Область № 3 — тыльной поверхности образца.

Обсуждения

Главным достоинством рентгеновской томографии является высокое простран-

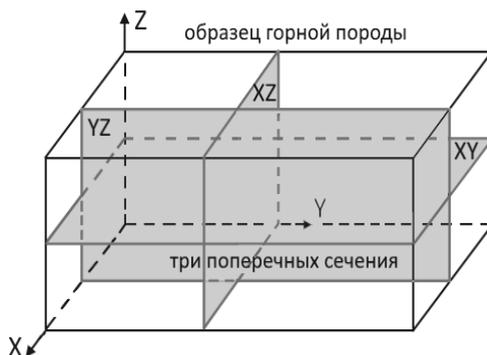


Рис. 4. Схема получения изображений сечений образцов диабазов с помощью лазерно-ультразвуковой томографии
 Fig. 4. The scheme for obtaining images of cross sections of diabase samples by laser ultrasound tomography

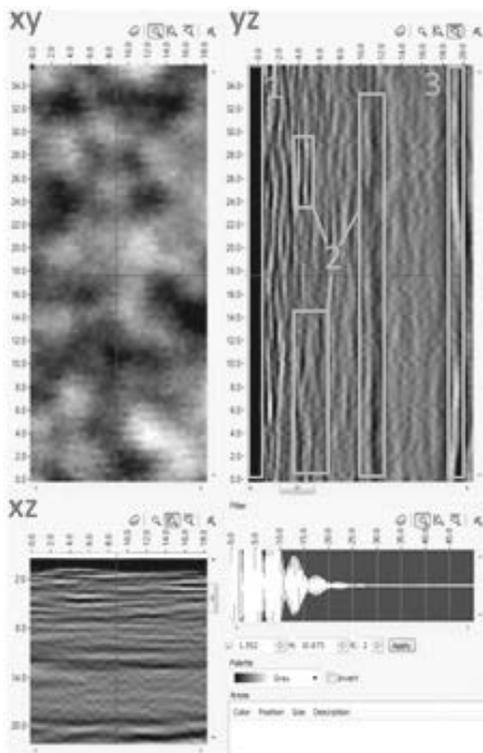


Рис. 5. Изображения трех сечений XY, YZ, XZ образца диабаз, полученные с использованием лазерно-ультразвуковой томографии
 Fig. 5. Images of three sections XY, YZ, XZ of a diabase sample obtained by laser ultrasound tomography

Таблица 3

Пористость образцов диабаз по результатам рентгеновской томографии
Porosity of diabase samples by x-ray tomography

№	Геометрия образца, мм	Закрытая пористость, %	Открытая пористость, %	Общая пористость, %
1	10x10x10	0,0103	0,3280	0,3383
2	10x10x20	1,3843	0,4786	1,8564
3	19x19x38	0,0250	0,3778	0,4037

ственное разрешение, а также возможность трехмерной визуализации внутренней структуры образца, при этом образец сохраняется для других видов исследований. Однако данный метод не представляет данных о физико-механических свойствах образцов.

Метод лазерной ультразвуковой томографии позволяет изучить внутреннюю структуру образцов горной породы, а также получать данные об упругих модулях горных пород. В настоящее время технология изучения кернов на основе лазерного ультразвука также имеет свои недостатки, такие как отсутствие большой статистической базы данных о внутренней структуре различных групп горных пород, сложная интерпретация полученных данных.

В комплексном использовании всех вышеперечисленных методов возможно изучать основные физико-механические свойства горных пород, наиболее важные свойства образцов различных генотипов. Например, для осадочных горных пород, в частности, терригенных подойдет метод лазерно-ультразвуковой структуроскопии и томографии, так как есть возможность измерять скорости поперечных и продольных волн с высокой точностью, соответственно оценивать пористость и локальные

модули упругости. Для магматических (сильно неоднородных, нарушенных) будет эффективен метод рентгеновской томографии. Для метаморфических — комплекс методов в зависимости от приоритета необходимых для изучения свойств.

Заключение

Полученные результаты будут полезны при создании технологии «Цифровой керн» (ЦК) на основе лазерно-ультразвуковой структуроскопии или томографии. Разномасштабные объемные базы данных кернавого материала можно использовать для расширения так называемого «Цифрового кернаохранилища». Трехмерные модели образца с использованием данных, полученных лазерно-ультразвуковыми методами, дают возможность оценить такие объемные характеристики, как пористость, проницаемость, размер, форму и объем частиц, площадь поверхности в диапазоне масштабов от десятков миллиметров до микронного уровня. Создание и изучение детальных трехмерных моделей образцов нефтегазовых пород-коллекторов даст возможность максимально точно оценить подсчетные параметры, а также планировать и моделировать методы увеличения нефтеотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esmailzadeh A., Behnam S., Mikaeil R.* Relationship between Texture and Uniaxial Compressive Strength of Rocks // Civil engineering journal, 2017, Vol. 3, pp. 480 – 486. DOI: 10.28991/cej-2017-000001066.

2. *Кравцов А., Иванов П. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Галеев А. А.* Исследование микроструктуры углей печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 56—65. DOI: 10.25018/0236—1493—2019—06—0-56—65.

3. *Кочанов А. Н.* К вопросу о микротрещинах и их исследовании на примере горных пород // Вестник российских университетов. Математика. — 2016. — №3. С. 798—801 DOI: 10.20310/1810—0198—2016—21—3-798—801

4. *Ямалетдинова К. Ш., Гоц С. С., Хакимов Р. М., Ямалетдинова А. А., Хафизов А. Р.* Исследование пористости горных пород методом сканирующей зондовой микроскопии // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: сборник научных трудов. — 2015. — С. 264—265.

5. *Vychkov A. S., Zarubin V. P., Karabutov A. A., Simonova V. A., Cherepetskaya E. B.* On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access // Photoacoustics, 2017, Vol. 5, pp. 10—16. DOI: 10.1016/j.pacs.2017.01.002.

6. *Kravcov A., Shibaev I. A., Blokhin D. I., Vychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Krapivnoi M. M., Zarubin V. P.* Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2018, Vol. 9, pp. 2258—2265.

7. *Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E. B., Sas I. E., Morozov N. A., Zatloukal J., Kořatkova J.* Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 722, pp. 247—253. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.247.

8. *Еременко Н. М., Муравьева Ю. А.* Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2012. — № 3. — С. 1—12.

9. *Галкин С. В., Ефимов А. А., Кривошеков С. Н., Савицкий Я. В., Черепанов С. С.* Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений // Геология и геофизика. — 2015. — № 5. — С. 995—1007.

10. *Karabutov A. A., Podymova N. B., Cherepetskaya E. B.* Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2017, Vol. 58, pp. 503—510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

11. *Liu X. S., Tan Y. L., Ning J. G., Lu Y. W., Gu Q. H.* Mechanical properties and damage constitutive model of coal in coal-rock combined body // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, Vol. 110, pp. 140—150. DOI: 10.3390/sym11081040.

12. *Zhu J. B., Zhou T., Liao Z. Y., Sun L., Chen R.* Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, Vol. 106, pp. 198—212. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.022.

13. *Schindler M., Batzle M. L., Prasad M.* Micro X-Ray computed tomography imaging and ultrasonic velocity measurements in tetrahydrofuran-hydrate-bearing sediments // Geophysical Prospecting, 2017, Vol. 65, pp. 1025—1036. DOI: 10.1111/1365—2478.12449.

14. *Vychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A.* Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // Laser Physics Letters, 2016, Vol. 13, No. 8, pp. 085401—085405. DOI: 10.1088/1612—2011/13/8/085401.

15. *Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A., Mironova E. A., Shibaev I. A., Vysotin N. G., Morozov D. V.* Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy // Key Engineering Materials, 2017, Vol. 755, pp. 242—247. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242.

16. *Grigoriev, K. S., Kuznetsov, N.Yu., Cherepetskaya, E. B., Makarov, V. A.* Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response

by heterogeneously polarized pulsed beams. *Optics Express*, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253–6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253

17. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V. A., Ertuganova E. A., Shibaev I. A., Ivanov P. N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics // *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 755, pp. 212–218.

18. Latief F. D. E., Mohamma I. H., Rarasati A. D. Digital 3D microstructure analysis of concrete using X-Ray micro computed tomography SkyScan 1173: A Preliminary Study // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 267, No. 012020. DOI: 10.1088/1757–899X/267/1/012020.

19. Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A. Improvement of Image Spatial Resolution in Optoacoustic Tomography with the Use of a Confocal Array // *Acoustical Physics*, 2018, Vol. 64, pp. 77–82. **MIAB**

REFERENCES

1. Esmailzadeh A. Behnam S. Mikaeil R. Relationship between Texture and Uniaxial Compressive Strength of Rocks. *Civil engineering journal*, 2017, Vol. 3, pp. 480–486. DOI: 10.28991/cej-2017–00000106.

2. Kravcov A. Ivanov P. N. Malinnikova O. N. Cherepetskaya E. B. Gapeev A. A. Laser-ultrasonic spectroscopy of the pechora basin coal microstructure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65. [In Russ].

3. Kochanov A. N. On the issue of microcracks and their study on the example of rocks. *Vestnik rossiyskikh universitetov. Matematika.* 2016. no. 3. pp. 798–801 DOI: 10.20310/1810–0198–2016–21–3-798–801 [In Russ].

4. Yamaletdinova K. S. Goc S. S. Hakimov R. M. Yamaletdinova A. A. Hafizov A. R. Study of the porosity of rocks by scanning probe microscopy. *Neftegazovye tekhnologii i novye materialy. Problemy i resheniya: sbornik nauchnyh trudov.* 2015, pp. 264–265. [In Russ].

5. Bychkov A. S. Zarubin V. P. Karabutov A. A. Simonova V. A. Cherepetskaya E. B. On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access. *Photoacoustics*, 2017, Vol. 5, pp. 10–16. DOI: 10.1016/j.pacs.2017.01.002.

6. Kravcov A. Shibaev I. A. Blokhin D. I. Bychkov A. S. Cherepetskaya E. B. Krapivnoi M. M. Zarubin V. P. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, Vol. 9, pp. 2258–2265.

7. Kravcov A. Svoboda P. Konvalinka A. Cherepetskaya E. B. Sas I. E. Morozov N. A. Zatloukal J. Kořátkova J. Evaluation of crack formation in concrete and basalt specimens under cyclic uniaxial load using acoustic emission and computed X-Ray Tomography. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 722, pp. 247–253. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.247.

8. Eremenko N. M. Muraveva Y. A. Application of X-ray microtomography methods to determine porosity in well core. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika.* 2012, Vol. 3, pp. 1–12. [In Russ].

9. Galkin S. V. Efimov A. A. Krivoshchekov S. N. Savickij Ya. V. Cherepanov S. S. Application of the X-ray tomography method in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields. *Geologiya i geofizika.* 2015, Vol. 5, pp. 995–1007. [In Russ].

10. Karabutov A. A. Podymova N. B. Cherepetskaya E. B. Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, Vol. 58, pp. 503–510. DOI: 10.1134/S0021894417030154.

11. Liu X. S. Tan Y. L. Ning J. G. Lu Y. W. Gu Q. H. Mechanical properties and damage constitutive model of coal in coal-rock combined body. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, Vol. 110, pp. 140–150. DOI: 10.3390/sym11081040.

12. Zhu J. B. Zhou T. Liao Z. Y. Sun L. Chen R. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, Vol. 106, pp. 198–212. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.022.
13. Schindler M. Batzle M. L. Prasad M. Micro X-Ray computed tomography imaging and ultrasonic velocity measurements in tetrahydrofuran-hydrate-bearing sediments. *Geophysical Prospecting*, 2017, Vol. 65, pp. 1025–1036. DOI: 10.1111/1365-2478.12449.
14. Bychkov A. S. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air. *Laser Physics Letters*, 2016, Vol. 13, no. 8, pp. 085401–085405. DOI: 10.1088/1612-2011/13/8/085401.
15. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Mironova E. A. Shibaev I. A. Vysotin N. G. Morozov D. V. Internal structure research of shungite by broadband ultrasonic spectroscopy. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 755, pp. 242–247. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.755.242.
16. Grigoriev, K. S. Kuznetsov, N.Yu. Cherepetskaya, E. B. Makarov, V. A. Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response by heterogeneously polarized pulsed beams. *Optics Express*, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253–6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253.
17. Kravcov A. Konvalinka A. Vinnikov V. A. Ertuganova E. A. Shibaev I. A. Ivanov P. N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 755, pp. 212–218.
18. Latief F. D. E. Mohamma I. H. Rarasati A. D. Digital 3D microstructure analysis of concrete using X-Ray micro computed tomography SkyScan 1173: A Preliminary Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 267, no. 012020. DOI: 10.1088/1757–899X/267/1/012020.
19. Bychkov A. S. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Improvement of Image Spatial Resolution in Optoacoustic Tomography with the Use of a Confocal Array. *Acoustical Physics*, 2018, Vol. 64, pp. 77–82.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галунин Андрей Алексеевич¹ – аспирант, galunin.andrew@yandex.ru;

Степанов Георгий Дмитриевич¹ – студент;

Безруков Вадим Игоревич¹ – студент;

Свобода Павел² – PhD;

Кравцов Александр² – PhD;

¹ Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия;

² Чешский технический университет в Праге, факультет гражданского строительства, кафедра Геотехники, Чешская Республика.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galunin A. A.¹, PhD-student, galunin.andrew@yandex.ru;

Stepanov G. D.¹, student;

Bezrukov V. I.¹, student;

Svoboda P.², PhD;

Kravcov A. N.², PhD;

¹ National Research Technological University “MISIS” Mining Institute, Moscow, Russia;

² Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 17.02.2021; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 20.01.2021; received after the review 17.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.