УДК 622.02

DOI: 10.25018/0236 1493 2022 112 0 5

# ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ БИОЛОГИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

М.Е. Меженов<sup>1</sup>, Д.В. Зайцев<sup>1</sup>, А.Н. Кочанов<sup>2</sup>, П.Е. Панфилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: Zaytsev@m.ursmu.ru

<sup>2</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия <sup>3</sup> Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Изучено деформационное поведение на макроскопическом масштабе горных пород (ГП) и неорганических материалов биологического генезиса (скорлупы яиц курицы и серой цапли), которые более чем на 90% состоят из карбоната кальция, при испытаниях на изгиб и срез на воздухе и в воде. Также было изучено поведение трещин в скордупе яиц при изгибе на микроскопическом масштабе в воде и на воздухе. Результаты, полученные на образцах из скорлупы яиц, сравнили с данными по песчанику, граниту и антрациту. На основании полученных результатов можно заключить, что тип деформационного поведения горных пород и неорганических материалов биологического генезиса на макроскопическом масштабе определяется уровнем растягивающих напряжений в схеме нагружения и меняется от хрупкого при изгибе и диаметральном сжатии до вязкоупругого при одноосном сжатии и срезе. На микроскопическом масштабе, поведение ГП и образцов из скордупы было аттестовано как вязкоупругое. Влияние водной среды не приводит к качественным изменениям в деформационном поведении изученных материалов независимо от их генезиса. Механизм влияния воды на поведение горных пород и неорганических материалов биологического генезиса можно объяснить в рамках эффекта Ребиндера, а именно пластификации материала в области трещины, где под влиянием атомов внешней среды протекание процессов аккомодации напряжений резко ускоряется, но смены типа деформационного поведения не происходит.

**Ключевые слова:** горные породы, песчаник, гранит, антрацит, скорлупа птичьих яиц, механические свойства, разрушение, трещины, хрупкость, вязкоупругость, влияние водной среды. **Благодарность:** Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ-СО № 20-48-660017. **Для цитирования:** Меженов М. Е., Зайцев Д. В., Кочанов А. Н., Панфилов П. Е. Особенности разрушения горных пород и неорганических материалов биологического генезиса в водной среде // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11-2. –

# Features of the destruction of rocks and inorganic materials of biological genesis in the water

C. 5-15. DOI: 10.25018/0236 1493\_2022\_112\_0\_5.

M.E. Mezhenov<sup>1</sup>, D.V. Zaytsev<sup>1</sup>, A.N. Kochanov<sup>2</sup>, P.E. Panfilov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: Zaytsev@m.ursmu.ru <sup>2</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia <sup>3</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia **Abstract:** The macroscopic deformation behavior of rocks and inorganic materials of biological genesis (chicken and gray heron egg shells), which are more than 90% calcium carbonate in bending and shear tests in air and water, has been studied. The behavior of cracks in the egg shell during bending on a microscopic scale in water and in air was also studied. The results obtained on eggshell samples were compared with those obtained from sandstone, granite and anthracite. Based on the results obtained, it can be concluded that the type of deformation behavior of rocks and inorganic materials of biological origin on a macroscopic scale is determined by the level of tensile stresses in the loading scheme and changes from brittle in bending and diametrical compression to viscoelastic in uniaxial compression and shear. On a microscopic scale, the behavior of the rocks and shell specimens was certified as viscoelastic. The influence of the aqueous medium does not lead to qualitative changes in the deformation behavior of the studied materials, regardless of their genesis. The mechanism of the influence of water on the behavior of rocks and inorganic materials of biological genesis can be explained in terms of the Rehbinder effect, namely, plasticization of the material in the area of the crack, where, under the influence of the atoms of the external environment, the processes of stress accommodation are sharply accelerated, but the change in the type of deformation behavior does not occur.

*Key words:* rocks, sandstone, granite, anthracite, bird egg shells, mechanical properties, fracture, cracks, brittleness, viscoelasticity, influence of the aquatic environment.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and Sverdlovsk Region, Grant No. 20-48-660017.

*For citation:* Mezhenov M. E., Zaytsev D. V., Kochanov A. N., Panfilov P. E. Features of the destruction of rocks and inorganic materials of biological genesis in the water. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11-2):5-15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_112\_0\_5.

#### Введение

Одной из проблем, имеющих важное значение для горного дела, является то, как влияет происхождение горной породы (ГП) на тип ее деформационного поведения, в том числе в условиях контакта с водной средой [1-3]. Отчасти влияние воды на механические свойства ГП объясняется в рамках эффекта Ребиндера, описывающего механизм пластификации неорганического материала при контакте с атомами внешней среды [4]. Синтетические керамики, как правило, разрушаются хрупко [5], поскольку в них отсутствует канал аккомодации упругой деформации за счет либо пластичности, как в металлах и сплавах [6], либо за счет вязко-упругости, как в полимерных материалах [7, 8].

По химическому составу ГП близки к конструкционным керамикам, тогда как их структура и морфология более сложные [9]. Кроме того, деформационное поведение ГП существенно отличается от поведения синтетических керамик, в частности, многие из них не только не охрупчиваются, а даже пластифицируются под действием водной среды [10]. Исследование деформационного поведения малогабаритных лабораторных образцов (МГЛО) ГП позволило детально описать процесс аккомодации напряжений на макро- и микромасштабах, включая развитие трещин [11]. Показано, что при одноосном сжатии образцы цилиндрической формы из гранита и яшмы демонстрируют вязкоупругое поведение, тогда как при непрямом растяжении или диаметральном сжатии они ведут хрупко, что подтверждается типом морфологии поверхностей изломов [12—14]. Изучение трещин, развивающихся в МГЛО ГП различного генезиса при непрямом растяжении (диаметральном сжатии или бразильском тесте), показало, что трещины в них развиваются на вязкоупругий манер, подобно трещинам в пластичных металлах, а влияние водной среды может быть описано в рамках эффекта Ребиндера [15].

У экспериментов на МГЛО есть недостаток, связанный с тем, что полученные результаты зависят от качества приготовления поверхности образцов. Это существенно для хрупких материалов, к которым относится большинство ГП. Однако эту трудность можно обойти, если проводить эксперименты на образцах из скорлупы яиц птиц, которые можно рассматривать как карбонатный неорганический материал биологического происхождения. Механические свойства скорлупы птичьих яиц, состоящей более чем на 90% из СаСО, изучались многими исследователями. В большинстве работ исследовалось поведение яйца как объекта механического нагружения [16, 17]. Яйцо обладает высокой прочностью, несмотря на склонность яичной скорлупы к хрупкому разрушению [18, 19]. Однако механические свойства образцов, вырезанных из яичной скорлупы, подробно не изучались. Яичная скорлупа является уникальным материалом среди неорганических материалов биологического происхождения, поскольку она обладает двумя естественными поверхностями, которые оказываются нетронутыми при подготовке образцов [20]. Целью данной работы является изучение влияния водной среды на деформационное поведение и разрушение ГП и скорлупы яиц — неорганических материалов биологического происхождения при растяжении.

### Методика эксперимента

В качестве модельных материалов для исследований были использованы: скорлупа яиц курицы и серой цапли, песчаник, гранит и антрацит. Белки и желтки извлекали из яиц, скорлупу которых затем просушивали в течение суток. Образцы для испытаний готовили следующим образом: высушенные яйца помещали на подложку из монтажной пены и фиксировали на режущем станке; после чего из средней части скорлупы при помощи алмазного диска вырезали образцы вдоль главной оси яйца. Длина образцов была около 50 мм, ширина - 3 мм, а толщина варьировалась от 0,3 до 0,5 мм, в зависимости от вида яйца. Механические испытания по схемам 3-х точечного изгиба и среза на воздухе и в воде проводили при помощи испытательной машины Shimadzu AG-X50KN(скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин) и пакета программ Trapezium™. Для механических испытаний по каждой схеме использовали по 20 образцов: 10 образцов для испытаний на воздухе и 10 образцов для испытаний в водной среде. Деформационное поведение скорлупы яиц на микроуровне, а именно рост трещин в образцах, изучали при in situ изгибе образцов на предметном столике металлографического микроскопа. Рабочую поверхность образца в области стрелы изгиба документировали при помощи цифровой камеры, сопряженной с микроскопом. Необходимый контраст обеспечивался путем окраски рабочих поверхностей образцов в фиолетовый цвет. Топограммы образцов с трещинами составлялись по цифровым изображениям рабочих поверхностей. С помощью данных топограмм исследовались трещины в образцах.

Образцы для испытаний на диаметральное сжатие из песчаника, серпентинита, гранита и антрацита в форме цилиндров диаметром 6 мм и высотой

3 мм высверливали из массивных образцов полым алмазным сверлом под водным орошением, как рекомендуется в [21]. Испытания по схеме диаметрального сжатия проводили при помощи испытательной машины Shimadzu AG-X 50KN (скорость перемещения траверсы 0,1 мм/мин) и пакета программ Тгарегішттм на воздухе и в воде. Развитие трещин в образцах изучали при помощи металлографических микроскопов.

## Результаты экспериментов

Типичные деформационные кривые образцов из скорлупы куриных яиц при изгибе на воздухе и в воде приведены на рис. 1, a. На рис. 1, b представлены деформационные кривые образцов из скорлупы куриных яиц при испытании

по схеме среза на воздухе и в воде. Механические свойства образов из куриной скорлупы в этих условиях приведены в таблице. Ход деформационных кривых для всех схем испытания в обоих средах близок к прямолинейному, что ожидаемо для неорганических материалов различной природы. При изгибе, когда деформация до распада образца на части не превышала 0,2% для обоих сред при высоких упругом модуле и пределе прочности (20 ГПа и 40 МПа (на воздухе) и 25 МПа (в воде), соответственно), поведение куриной скорлупы можно аттестовать как хрупкое. При срезе, несмотря на описанный выше ход деформационных кривых, поведение образцов можно оценить, как вязкоупругое, на что указывает значительная деформация до

Механические свойства образцов, вырезанных из скорлупы куриных яиц, при испытаниях на 3-х точечный изгиб и срез на воздухе и в воде Mechanical properties of the samples cut along axis of chicken eggshell during 3-point bending and shear in the air and water

	<i>Е</i> , ГПа	σ <b>, МПа</b>	δ, %
3-х точечный изгиб			
На воздухе	20±5	40±8	0,25±0,05
В воде	20±5	25±5	0,15±0,05
Срез			
На воздухе	0,10±0,05	13±4	13±7
В воде	0,60±0,05	9±2	10±3

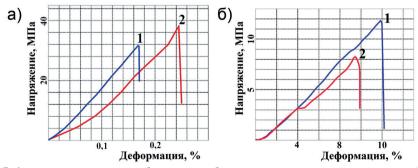


Рис. 1. Деформационные кривые лабораторных образцов, приготовленных из скорлупы яйца курицы, при испытаниях на воздухе (кривая 1) и в воде (кривая 2): трехточечный изгиб (a); испытание на срез (б) Fig. 1. Stress-strain curves of the samples cut along the axis of a chicken eggshell in the air (curve 1) and in the water (curve 2): three-point bending (a); shearing (b)

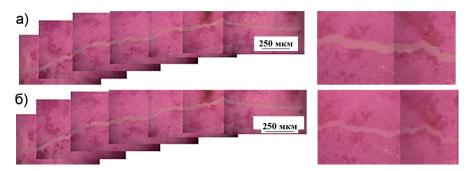


Рис. 2. Развитие трещин в лабораторных образцах, приготовленных из скорлупы яйца курицы (окрашены в фиолетовый цвет для повышения контраста), при изгибе на воздухе: изгиб 1 (до появления трещины) (а); изгиб 2 — подрастание трещины (стрела прогиба 0,1 мм на базе 10 мм) (б) Fig. 2. Evolution of the crack in the sample of chicken eggshell under bending on air: bending 1 (crack appearance) (a); bending 2 (bending arrow 100 µm) (b)

разрушения и низкие значения упругих модулей и предела прочности (модуль упругости на воздухе 150 МПа, в воде — 600 МПа, предел прочности 10 МПа при относительной деформации 10%).

Полученные результаты показывают, как влияет водная среда на деформационное поведение образцов, вырезанных из куриной скорлупы. Первое, под влиянием воды изменения типа деформационного поведения скорлупы не происходит: при изгибе — хрупкое, при срезе — вязкоупругое. Второе, при изгибе в воде наблюдается снижение предела прочности и деформации до разрушения. Напротив, при срезе предел прочности практически не зависит от среды

испытания, тогда как упругий модуль при испытании в воде в несколько раз выше, чем на воздухе, также деформация до разрушения на воздухе на четверть выше, чем при испытании в воде. Деформационное поведение образцов, вырезанных из яиц серой цапли, не отличается от описанного выше.

Результаты исследования развития трещин в образцах, вырезанных из скорлупы куриных яиц, при изгибе на воздухе и в воде приведены на рис. 2 и 3, соответственно. Трещины возникли в области максимального прогиба и пересекали образец от края до края. Во всех случаях трещины обладали ломаным профилем, характерным для трещин в вяз-



Рис. 3. Развитие трещин в лабораторных образцах, приготовленных из скорлупы яйца курицы (окрашены в фиолетовый цвет для повышения контраста) и предварительно вымоченных в воде в течение 24 ч, при изгибе на воздухе: изгиб 1 (до появления трещины) (а); изгиб 2 — подрастание трещины (стрела прогиба 0,05 мм на базе 10 мм) (б)

Fig. 3. Evolution of the crack in the sample of chicken eggshell under bending in water: bending 1 (crack appearance) (a); bending 2 (bending arrow 50  $\mu$ m) (b)

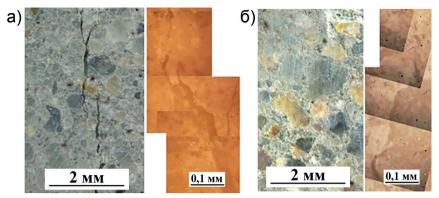


Рис. 4. Развитие трещин в лабораторных образцах, приготовленных из песчаника, возникших в процессе испытания на диаметральное сжатие: на воздухе (а); в воде (б)

Fig. 4. Evolution of the crack in the sample of sandstone under diametrical compression: on air (a); in water (b)

коупругих материалах. Из-за кривизны образцов определить величину стрелы прогиба, при котором это произошло, было невозможно. Однако удалось определить величину стрелы прогиба, при которой ширина трещины увеличивалась, но образец еще не распадался на части. Для испытаний на воздухе стрела была 0,1 мм при базе 10 мм, тогда как при изгибе в воде стрела стала в два раза меньше (0,05 мм на базе 10 мм). Подрастание трещин в образцах при такой жесткой схеме нагружения, как изгиб, указывает на вязкоупругий характер деформационного поведения скорлупы куриных яиц на микроуровне. Снижение стрелы прогиба до распада образца на части при изгибе в воде можно объяснить эффектом Ребиндера [1, 4].

Трещины в скорлупе серой цапли развиваются подобным образом.

На рис. 4 и 5 показаны трещины, возникшие в образцах при испытании по схеме диаметрального сжатия на воздухе и в воде, в МЛГО песчаника и гранита, соответственно. Во всех случаях трещины имели ломаный профиль и состояли из слившихся и почти слившихся порообразных трещин [22, 23]. Отмечено, что ширина трещин при испытании в воде была не менее, чем в два раза меньше, чем при испытании на воздухе. Механизм данного явления объяснили эффектом Ребиндера [4]. Эффект пластификации ГП в воде подтверждается данными по испытаниям на диаметральное сжатие МЛГО антрацита [24]. При испытании на воздухе антрацит ве-



Рис. 5. Развитие трещин в лабораторных образцах, приготовленных из серого гранита, возникших в процессе испытания на диаметральное сжатие: на воздухе (a); в воде (б)

Fig. 5. Evolution of the crack in the sample of gray granite under diametrical compression: on air (a); in water (b)

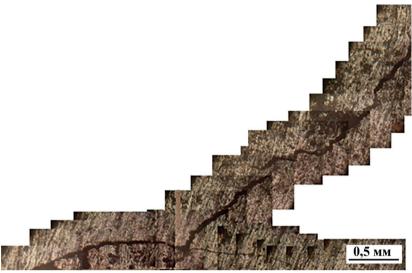


Рис. 6. Развитие трещины в лабораторном образце антрацита, возникшей в процессе испытания на диаметральное сжатие в воде

Fig. 6. Evolution of the crack in the sample of anthracite under diametrical compression in water

дет себя хрупко, распадаясь на части столь быстро, что наблюдать трещины в образцах после диаметрального сжатия невозможно. Однако при испытании в воде, скорость роста трещины снижается и ее можно видеть в образце после испытаний (рис. 6). По своей морфологии трещины в антраците близки к трещинам в других ГП [25], включая такие биоминералы, как скорлупа птичьих яиц.

#### Обсуждение результатов

Представленные выше экспериментальные данные показывают, что ГП и образцы из скорлупы птичьих яиц при преобладании в схеме деформирования растягивающих напряжений демонстрируют хрупкое деформационное поведение на макроуровне. Однако, если уровень растягивающих напряжений становится ниже некоторого критического значения, макроскопическое поведение ГП независимо от происхождения становится вязкоупругим. Также показано, что тип поведения ГП на макроуровне не зависит от среды испытания (воздух или вода).

Показано, что на микроскопическом масштабе поведение ГП и образцов из скорлупы птичьих яиц, описанное по развитию трещин, может быть аттестовано как вязкоупругое. На это указывает морфология трещин, которая близка к морфологии трещин в пластичных металлах. Количественное влияние на параметры трещин в ГП и в образцах из скорлупы птичьих яиц оказывает и водная среда. Механизм этого влияния можно объяснить в рамках эффекта Ребиндера, а именно пластификации неорганического материала в области трещины, где под влиянием атомов внешней среды протекание процессов аккомодации напряжений резко ускоряется, но смены типа деформационного поведения не происходит [4].

#### Заключение

На основании полученных результатов можно заключить, что тип деформационного поведения ГП и образцов из скорлупы птичьих яиц на макроскопическом масштабе определяется уровнем растягивающих напряжений в схе-

ме приложения нагрузки и меняется от хрупкого при изгибе и диаметральном сжатии до вязкоупругого при одноосном сжатии и срезе.

На микроскопическом масштабе поведение ГП и образцов из скорлупы

птичьих яиц было аттестовано как вязкоупругое.

Влияние водной среды не приводит к качественным изменениям в деформационном поведении модельных материалов, независимо от происхождения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Hudson J. A.*, *Harrison J. P.* Engineering rock mechanics. An Introduction to the Principles. Amsterdam, Pergamon, 2000, 456 p.
- 2. Haghighatpour P. J., Aliha M. R. M. Assessment of freezing and thawing cycle (FTC) effects on mixed mode I/III fracture toughness and work of fracture of HMA asphalt mixtures // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2022, vol. 118, article 103261. DOI: 10.1016/j. tafmec.2022.103261.
- 3. Боровков Ю. А., Фурман С. В. Оценка влияния увлажнения и минерального состава горных пород на их прочностные свойства для прогноза возможности прорыва подземных вод в рудник // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2007. -№ 1. -C. 276-280.
- 4. Ребиндер П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979, 203 р.
- 5. Kachanov M., Sevostianov I. Micromechanics of materials, with applications. Heidelberg, Springer Nature, 2018, 712 p. DOI: 10.1007/978-3-319-76204-3.
- 6. Argon A. S. Strengthening mechanisms in crystal plasticity. Oxford, Oxford University Press, 2012, 404 p.
- 7. Argon A. S. The physics of deformation and fracture of polymers. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 532 p.
- 8. Высотин Н. Г. Упругий гистерезис горных пород различных генотипов // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2022. -№ 5-2. C. 72-79. DOI: 10.25018/ 0236 1493 2022 52 0 72.
- 9. Vernon R. H. A practical guide to Rock Microstructure. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 606 p.
- 10. *Cerfontaine B., Collin F.* Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: Review, interpretation and research perspectives // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, vol. 51, pp. 391–414.
- 11. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 8. С. 5–13. DOI:  $10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_5$ .
- 12. Зайцев Д. В., Кочанов А. Н., Токтогулов Ш. Ж., Пантелеев И. А., Панфилов П. Е. Влияние масштабного эффекта и неоднородности горных пород при определении их прочностных свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2016. -№ 11. С. 208-215.
- 13. Зайцев Д. В., Кочанов А. Н., Пантелеев И. А., Панфилов П. Е.. О влиянии масштабного фактора при испытаниях на прочность образцов горных пород // Известия РАН. Серия Физическая. 2017. Т. 81. № 3. С. 367–370. DOI: 10.7868/S0367676517030401.
- 14. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Обобщение современных сведений о корреляционных зависимостях предела прочности на сжатие с иными прочностными показателями горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 5–19. DOI:  $10.25018/0236_1493_2022_6_05$ .

- 15. Kalachev V. A., Zaitsev D. V., Kochanov A. N., Kostandov Yu. A., Panfilov P. E. Effect of water on fracture of rocks under diametral compression // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 134, no. 1, article 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012023.
- 16. Jia Z., Yu Y., Hou S., Wang L. Biomimetic architected materials with improved dynamic performance // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2018, vol. 125, pp. 178–197.
- 17. Naleway S. E., Porter M. M., McKittrick J., Meyers M. A. Structural design elements in biological materials: Application to bioinspiration // Advanced Materials. 2015, vol. 27, pp. 5455 5476.
- 18. Carter T. C. Hens egg: some factors affecting deformation in statically loaded shells // British Poultry Science. 1970, vol. 11, pp. 15–38. DOI: 10.1080/00071667008415789.
- 19. Rodriguez-Navarro A., Kalin O., Nys Y., Garcia-Ruiz J., Poult Br. Influence of the microstructure on the shell strength of eggs laid by hens of different ages // British Poultry Science. 2002, vol. 43, pp. 395–403.
- 20. Taylor D., Walsh M., Cullen A., O'Reilly P. The fracture toughness of eggshell // Acta Biomaterialia. 2016, vol. 37, pp. 21–27.
- 21. *Dipayan J.* Sample preparation techniques in petrographic examinations of construction materials: a state-of-the-art review / Proceedings of the 28 conference on cement microscopy. Denver, Colorado, U.S.A., 2006. https://www.researchqate.net/publication/265106011.
- 22. *Hamza O., Stace R.* Creep properties of intact and fractured muddy siltstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 106. pp. 109 116.
- 23. Шибаев И. А., Белов О. Д., Сас И. Е. Определение динамических и статических модулей упругости образцов гранитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4-1. С. 5 15. DOI:  $10.25018/0236_1493_2021_41_0_5$ .
- 24. *Иванов П. Н., Блохин Д. И., Закоршменный И. М.* Экспериментальное исследование изменения физико-механических свойств антрацита при температурном воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4-1. С. 41 51. DOI: 10.25018/0236 1493 2021 41 0 41.
- 25. Хашпер А. Л., Аминев Т. Р., Федоров А. И., Жонин А. В. Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния // Геологический вестник. 2019. № 1. С. 133 140. DOI: 10.31084/2619-0087/2019-1-10.

#### **REFERENCES**

- 1. Hudson J. A., Harrison J. P. *Engineering rock mechanics. An Introduction to the Principles*. Amsterdam, Pergamon, 2000, 456 p.
- 2. Haghighatpour P. J., Aliha M. R. M., Assessment of freezing and thawing cycle (FTC) effects on mixed mode I/III fracture toughness and work of fracture of HMA asphalt mixtures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 118, article 103261. DOI: 10.1016/j. tafmec.2022.103261.
- 3. Borovkov Yu. A., Furman S. B. Evaluation of the influence of moisture and mineral composition of rocks on their strength properties to predict the possibility of groundwater breakthrough into the mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no. 1, pp. 276 280. [In Russ].
- 4. Rebinder P. A. *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fizi-ko-khimicheskaya mekhanika* [Selected works. Surface phenomena in disperse systems. Physico-chemical mechanics], Moscow, Nauka, 1979, 203 p.
- 5. Kachanov M., Sevostianov I. *Micromechanics of materials, with applications*. Heidelberg, Springer Nature, 2018, 712 p. DOI: 10.1007/978-3-319-76204-3.
- 6. Argon A. S. *Strengthening mechanisms in crystal plasticity*. Oxford, Oxford University Press, 2012, 404 p.
- 7. Argon A. S. *The physics of deformation and fracture of polymers*. Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 532 p.

- 8. Vysotin N. G. Elastic hysteresis of rocks of different genotypes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 72 79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 52 0 72.
- 9. Vernon R. H. *A practical guide to Rock Microstructure*. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 606 p.
- 10. Cerfontaine B., Collin F. Cyclic and fatigue behaviour of rock materials: Review, interpretation and research perspectives. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 391–414.
- 11. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Integrated effect of size on ultimate compressive strength of rock samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 8, pp. 5–13. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 8 0 5.
- 12. Zaitsev D. V., Kochanov A. N., Toktogulov Sh. Zh., Panteleev I. A., Panfilov P. E. Influence of scale effect and heterogeneity of rocks in determining their strength properties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 11, pp. 208 215. [In Russ].
- 13. Zaitsev D. V., Kochanov A. N., Panteleev I. A., and Panfilov P. E., On the influence of the scale factor in strength testing of rock samples. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*. 2017, vol. 81, no. 3, pp. 367–370. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0367676517030401.
- 14. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Generalization of up-to-date information on correlation dependences of ultimate compressive strength and other strength characteristics of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 5–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 6 0 5.
- 15. Kalachev V. A., Zaitsev D. V., Kochanov A. N., Kostandov Yu. A., Panfilov P. E. Effect of water on fracture of rocks under diametral compression. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 134, no. 1, article 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012023.
- 16. Jia Z., Yu Y., Hou S., Wang L. Biomimetic architected materials with improved dynamic performance. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2018, vol. 125, pp. 178–197.
- 17. Naleway S. E., Porter M. M., McKittrick J., Meyers M. A. Structural design elements in biological materials: Application to bioinspiration. *Advanced Materials*. 2015, vol. 27, pp. 5455 5476.
- 18. Carter T. C. Hens egg: some factors affecting defor- mation in statically loaded shells. *British Poultry Science*. 1970, vol. 11, pp. 15–38, DOI: 10.1080/00071667008415789.
- 19. Rodriguez-Navarro A., Kalin O., Nys Y., Garcia-Ruiz J., Poult Br. Influence of the microstructure on the shell strength of eggs laid by hens of different ages. *British Poultry Science*. 2002, vol. 43, pp. 395–403.
- 20. Taylor D., Walsh M., Cullen A., O'Reilly P. The fracture toughness of eggshell. *Acta Biomaterialia*, 2016, vol. 37, pp. 21–27.
- 21. Dipayan J. Sample preparation techniques in petrographic examinations of construction materials: a state-of-the-art review. *Proceedings of the 28 conference on cement microscopy*. Denver, Colorado, U.S.A., 2006, https://www.researchgate.net/publication/265106011.
- 22. Hamza O., Stace R. Creep properties of intact and fractured muddy siltstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 106. pp. 109 116.
- 23. Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static moduli of elasticity of granite samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4-1, pp. 5 15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_5.
- 24. Ivanov P. N., Blokhin D. I., Zakorshmenny I. M. Experimental study of changes in the physical and mechanical properties of anthracite under temperature exposure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4-1, pp. 41 51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_41.
- 25. Khashper A. L., Aminev T. R., Fedorov A. I., Zhonin A. V. Study of the dependence of rock permeability on its stress-strain state. *Geologicheskiy Vestnik*. 2019, no. 1, pp. 133 140. [In Russ]. DOI: 10.31084/2619-0087/2019-1-10.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Меженов Максим Евгеньевич $^1$  — студент, инженер-исследователь, e-mail: makxsm3121@amail.com. ORCID ID: 0000-0001-8183-2623, Зайцев Дмитрий Викторович $^1$  — д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой, e-mail: Zavtsev@m.ursmu.ru. ORCID ID: 0000-0002-8045-5309, Кочанов Алексей Николаевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: kochanov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7896-8546, Панфилов Петр Евгеньевич — д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Уральский федеральный университет, e-mail: peter panfilov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9068-049X, <sup>1</sup> Уральский государственный горный университет. Для контактов: Зайцев Д.В., e-mail: Zaytsev@m.ursmu.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.E. Mezhenov<sup>1</sup>, Student, Research Engineer, e-mail: makxsm3121@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8183-2623, D.V. Zaytsev<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Head of Chair, e-mail: Zavtsev@m.ursmu.ru, ORCID ID: 0000-0002-8045-5309, A.N. Kochanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: kochanov@mail.ru, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020. Moscow. Russia. ORCID ID: 0000-0001-7896-8546. P.E. Panfilov, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Senior Researcher, Ural Federal University, 620002. Ekaterinburg. Russia. e-mail: peter panfilov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9068-049X, <sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: D.V. Zaytsev, e-mail: Zaytsev@m.ursmu.ru.

Получена редакцией 16.06.2022; получена после рецензии 01.10.2022; принята к печати 10.10.2022. Received by the editors 16.06.2022; received after the review 01.10.2022; accepted for printing 10.10.2022.

