

## ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ

Е.Б. Черепецкая<sup>1</sup>, В.И. Безруков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: bezrukov.vi@misis.ru

**Аннотация:** Исследовалось изменение вязкости разрушения образцов  $K_{IC}$  при циклическом процессе замораживания-оттаивания горных пород Павловского месторождения архипелага Новая земля. Испытания проводились на полуцилиндрических образцах с пропилом, выполненным в центральной части перпендикулярно диаметру. Для этого из кернов диаметром  $D = 63$  мм в соответствии с ISRM были выпилены диски толщиной  $t = 25$  мм. Проводился их распил на две равные части, отклонение от диаметральной плоскости допускалось не более 0,2 мм. Глубина пропила  $a$ , имитирующего трещину, удовлетворяла условию  $0,4 \leq a/R \leq 0,6$  ( $R$  – радиус диска). Полученные образцы водонасыщались в течение 24 ч и замораживались. Заморозка образцов осуществлялась в течение 6 ч с помощью морозильных камер в двух режимах: при  $-20$  °C и при  $-50$  °C. После промерзания полуцилиндры помещались в контейнер с водой не менее чем на 2 ч, где их полностью оттаивали. Было проведено 10 и 20 циклов. Исследование процессов температурного выветривания выявило снижение вязкости разрушения горных пород. Образцы после 10 циклов замораживания при  $-20$  °C показывают снижение коэффициента трещиностойкости на 9%, при 20 циклах – на 28%. Воздействие более высоких отрицательных температур оказывает еще большее влияние на снижение исследуемого параметра, так воздействие 10 циклов при  $-50$  °C снижает вязкость разрушения на 23%, 20 циклов при той же температуре – на 32%.

**Ключевые слова:** вязкость разрушения, коэффициент трещиностойкости, трещина нормального отрыва, замораживание-оттаивание.

**Для цитирования:** Черепецкая Е. Б., Безруков В. И. Оценка коэффициента трещиностойкости при циклическом воздействии температурными полями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 49–58. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_49.

### Fracture toughness under different temperature effects

E.B. Cherepetskaya<sup>1</sup>, V.I. Bezrukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISS», Moscow, Russia, e-mail: bezrukov.vi@misis.ru

**Abstract:** The study addresses the fracture toughness  $K_{IC}$  of rock sample from Pavlovskoe deposit, Novaya Zemlya archipelago, in cyclic freeze–thaw tests. The testing samples were half-cylinders with a cut made in the center of a sample in perpendicular to its diameter. From the cores with the diameter  $D = 63$  mm, the disks with the thickness  $t = 25$  mm were cut out as per ISRM. They were cut into two equal parts at the tolerable deviation from the centerplane not more than by 0.2 mm. The fracture-simulating cut depth  $a$  obeyed the condition  $0,4 \leq a/R \leq 0,6$  ( $R$  – the diskradius).

© Е.Б. Черепецкая, В.И. Безруков. 2023.

The manufactured samples were saturated with water for 24 h and then were frozen. Freezing lasted for 6 hours in refrigerators in two regimes: at  $-20^{\circ}\text{C}$  and at  $-50^{\circ}\text{C}$ . After freezing, the half-cylinders were placed in tanks filled with water for not less than 2 h, up to total thawing. All in all, 10 and 20 cycles were carried out. The temperature erosion studies reveal a decrease in the fracture toughness of the rock samples. After 10 and 20 cycles of freezing at  $-20^{\circ}\text{C}$ , the samples show the decrease in the fracture toughness by 9% and 28%, respectively. Even lower temperature has a higher impact on the test parameter. For instance, after 10 and 20 cycles of freezing at  $-50^{\circ}\text{C}$ , the decrease in the fracture toughness of the samples reaches 23% and 32%, respectively.

**Key words:** fracture toughness, tensile crack, freeze–thaw.

**For citation:** Cherepetskaya E. B., Bezrukov V. I. Fracture toughness under different temperature effects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):49–58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_49.

---

## Введение

В последнее время интенсивно осваиваются месторождения в сложных горно-геологических условиях, таких как, например, зона вечной мерзлоты. Поэтому при выборе технологии разработки особое внимание необходимо уделять исследованиям физико-механических свойств геоматериала и их изменению под воздействием процессов выветривания [1–3], а также учитывать данные изменения при выборе метода численного моделирования [4–9].

В горных инженерных задачах, связанных с расчетом напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, подземных выработок, бортов карьеров, откосов, следует учитывать, что наличие микро- и макротрещин существенно изменяет НДС [10]. Кроме того, трещиноватость горных пород также играет ключевую роль в эксплуатации энергетических ресурсов [11–15], так как создание новых трещин в массиве увеличивает эффективность добычи нефти, природного газа [16] и геотермальной энергии. Поэтому определять параметры геосреды, при которых становится возможным зарождение и распространение трещин для предотвращения одних процессов или стимуляции других является актуальной задачей.

Математическое описание процесса развития трещин в массиве горных пород или образцах, проявляющих нелинейные упругие и пластические свойства, представляет сложную задачу [17–18]. Поэтому для оценки возможностей возникновения и развития трещин вводят определяемый в большинстве случаев экспериментально параметр, называемый коэффициентом трещиностойкости  $K_{\text{IC}}$ , или вязкостью разрушения [19]:  $K_{\text{IC}}$  является параметром, характерным для трещин нормального отрыва, определяет интенсивность напряжений, возникающих в устье трещины определенного размера.

Для определения коэффициента трещиностойкости  $K_{\text{IC}}$  при наличии трещин первого типа существует множество методов испытаний с различной геометрией образцов [20–27], при этом наиболее распространенным является метод испытания полуцилиндрических образцов с пропилом, выполненным в центральной части перпендикулярно диаметру.

Поэтому в настоящей работе исследовалось изменение вязкости разрушения образцов  $K_{\text{IC}}$  при циклическом процессе замораживания-оттаивания горных пород Павловского месторождения архипелага Новая земля.

## Материалы и методы

Исследовались образцы, полученные при бурении одной из скважин с трех разных глубин: 61, 80 и 236 м. При увеличении глубины наблюдалось изменение минерального состава горных пород. Основным минералом в образцах, взятых с глубины порядка 61 м, являлась роговая обманка. Здесь же присутствовали включения кварца. Размер минеральных зерен варьировался от 100 мкм до 1 мм. При увеличении глубины до 80 м основным минералом становится доломит с жилами кварцита. Образцы, полученные с глубины в 236 м, состоят из кальцита с преобладающими включениями пирита и небольшим количеством кварцита. Микрофотография образца аншлифа представлена на рис. 1.

Среди отечественных нормативных документов нет стандартов, необходимых для определения вязкости разрушения горных пород. В связи с этим было решено воспользоваться рекомендациями международного общества механики горных пород ISRM [27]. Из кернов диаметром  $D = 63$  мм на камнерезном станке в соответствии с ISRM [27] были

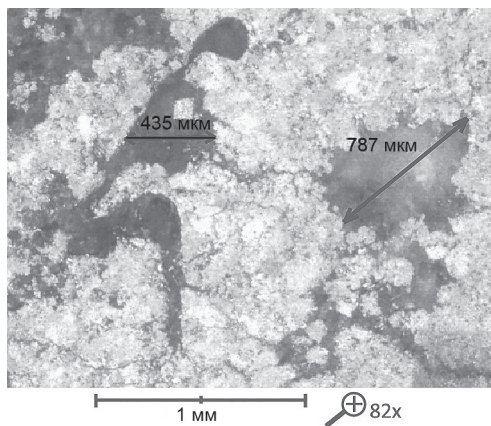


Рис. 1. Микрофотография включений аншлифа кальцита

Fig. 1. Micrograph of calcite anisotropy inclusions

выпилены диски толщиной  $t = 25$  мм. Во время подготовки образцов использовалась охлаждающая жидкость, чтобы избежать теплового повреждения, которое может повлиять на вязкость разрушения. Следующим этапом проводился распил дисков на две равные части, отклонение от диаметральной плоскости допускалось не более 0,2 мм. Сам пропилен в соответствии со стандартом [27] осуществлялся диском толщиной  $1,0 \pm$

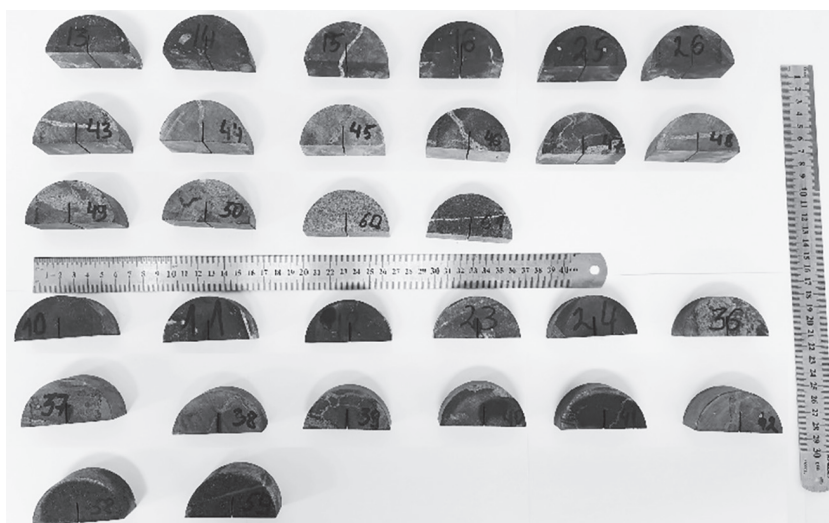


Рис. 2. Подготовленные образцы в соответствии с ISRM [27]

Fig. 2. Prepared samples in accordance with ISRM [27]

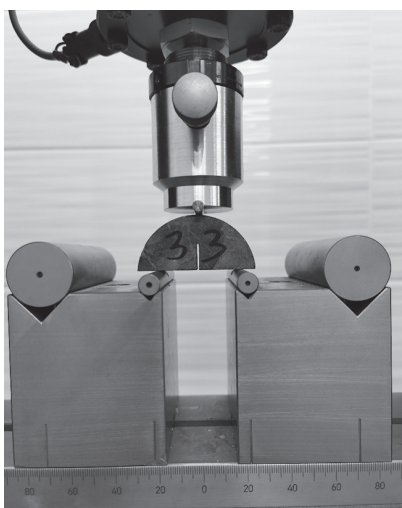


Рис. 3. Нагрузочный элемент испытательной машины LFM-50kH

Fig. 3. Load element of testing machine LFM-50kH

$\pm 0,2$  мм. Глубина пропила  $a$  удовлетворяла условию  $0,4 \leq a/R \leq 0,6$  ( $R$  — радиус диска). При этом плоскость надреза отклонялась от перпендикулярности по отношению к остальным граням менее чем на  $0,5^\circ$ .

Таким образом всего было изготовлено 60 образцов, которые были поделены на три группы. На рис. 2 изображены некоторые из них. Первая часть состояла из 10 образцов, с ними были проведены испытания при исходной влажности, вторая — также состояла из 10 образцов, прошедших процесс водонасыщения. Третья группа была самая большая, она состояла из 40 образцов, прошедших циклическое замораживание, половина из которых прошли 10 цик-

лов замораживания-оттаивания, и оставшиеся — 20 циклов.

Заморозка образцов осуществлялась с помощью морозильных камер в двух режимах: при  $-20^\circ\text{C}$  и при  $-50^\circ\text{C}$  в соответствии с ГОСТ 30629-2011. Цикл замораживания-оттаивания осуществлялся следующим образом: все образцы проходили водонасыщение в течение 24 ч, после чего с поверхности удалялась лишняя влага, затем образцы помещались в морозильную камеру минимум на 6 ч. После промерзания полуцилиндры помещались в контейнер с водой не менее чем на 2 ч, где они полностью оттаивали.

Испытания проводилось на испытательной машине LFM-50kH со стандартным нагружающим элементом, предназначенным для испытаний на трехточечный изгиб (рис. 3). Образец помещался на два нижних загрузочных цилиндрических ролика, которые находились на расстоянии  $s$  друг от друга, удовлетворяющем условию  $0,5 \leq s/D \leq 0,8$ . Верхний нагрузочный ролик располагался таким образом, чтобы приложенная нагрузка симметрично распределялась между нижними опорными роликами. Скорость нагружения поддерживалась  $0,2$  мм/мин для предотвращения влияния динамических эффектов.

После разрушения образца фиксировалась максимальная разрушающая нагрузка с точностью  $0,01$  кН, а также проверялось расположение плоскости разрушения. При ее отклонении от плоскости надреза более чем на  $3,2$  мм результаты

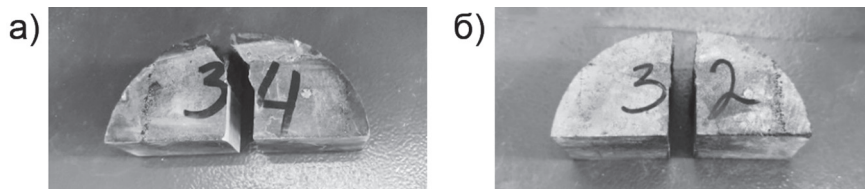


Рис. 4. Примеры разрушения образцов при испытаниях на трехточечный изгиб: образец с критическим (а) и образец с допустимым (б) отклонением плоскости разрушения

Fig. 4. Examples of destruction of samples during three-point bending tests: the sample with a critical deviation of the fracture plane (a); sample with an acceptable deviation of the fracture plane (b)

считались недействительными в соответствии с ISRM [27]. Пример забракованного образца приведен на рис. 4, а. Для него отклонение плоскости разрушения от плоскости пропила составило 6 мм. С образцами, плоскость разрушения которых отклонялась на допустимое значение, проводился дальнейший анализ, рис. 4, б. После проведения испытаний производился расчет вязкости разрушения в соответствии с требованиями [27] по формуле:

$$K_{IC} = Y' \cdot \frac{P_{\max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{2 \cdot R \cdot t}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  — разрушающая нагрузка;  $a$  — глубина пропила;  $R$  — радиус образца;  $t$  — толщина образца.

Безразмерный коэффициент  $Y'$  определяется геометрическими параметрами образца:

$$Y' = -1,297 + 9,516 \cdot \frac{s}{2 \cdot R} - \left( 0,470 + 16,457 \cdot \left( \frac{s}{2 \cdot R} \right) \right) \cdot \beta + \left( 1,071 + 34,401 \cdot \left( \frac{s}{2 \cdot R} \right) \right) \cdot \beta^2, \quad (2)$$

где  $\beta = a/R$ .

### Геометрические параметры и физико-механические свойства образцов Geometric parameters and physical and mechanical properties of samples

№	s, мм	$\beta$	a, мм	t, мм	R, мм	$P_{\max}$ , кН	$Y'$	$K_{IC}$ , МПа м <sup>0.5</sup>	СКО, МПа м <sup>0.5</sup>	Среднее значение, МПа м <sup>0.5</sup>
<b>Образцы в исходном состоянии</b>										
1	44,0	0,460	14,4	25,3	31,3	2,79	5,198	1,95	0,07	1,94
2	43,8	0,465	14,4	25,3	31,0	2,62	5,282	1,88		
3	44,4	0,465	14,5	25,5	31,2	2,81	5,332	2,01		
<b>Образцы в водонасыщенном состоянии</b>										
4	44,5	0,455	14,7	25,6	32,3	3,03	5,015	1,97	0,14	1,84
5	43,7	0,475	14,4	25,3	30,3	2,20	5,547	1,69		
6	44,1	0,446	14,0	25,8	31,4	2,82	5,038	1,84		
<b>Образцы после 10 циклов замораживания при -20 °С</b>										
7	44,0	0,464	14,3	25,8	30,8	2,52	5,352	1,80	0,09	1,78
8	44,4	0,465	14,5	25,3	31,2	2,32	5,332	1,67		
9	44,3	0,467	14,7	24,6	31,5	2,54	5,276	1,86		
<b>Образцы после 10 циклов замораживания при -50 °С</b>										
10	43,4	0,455	13,8	26	30,3	2,06	5,269	1,43	0,10	1,48
11	43,5	0,471	14,5	25,5	30,8	1,94	5,352	1,41		
12	44,3	0,450	14,1	24,9	31,3	2,30	5,137	1,60		
<b>Образцы после 20 циклов замораживания при -20 °С</b>										
13	44,0	0,468	14,6	25,4	31,2	1,95	5,309	1,40	0,02	1,42
14	44,8	0,465	14,6	25,6	31,4	1,98	5,351	1,41		
15	44,7	0,454	14,7	25,7	32,4	2,23	5,009	1,44		
<b>Образцы после 20 циклов замораживания при -50 °С</b>										
16	44,2	0,458	14,3	25,9	31,2	1,98	5,229	1,36	0,05	1,34
17	44,6	0,473	14,2	25,8	30	1,64	5,733	1,28		
18	44,9	0,468	14,6	25,3	31,2	1,86	5,444	1,37		



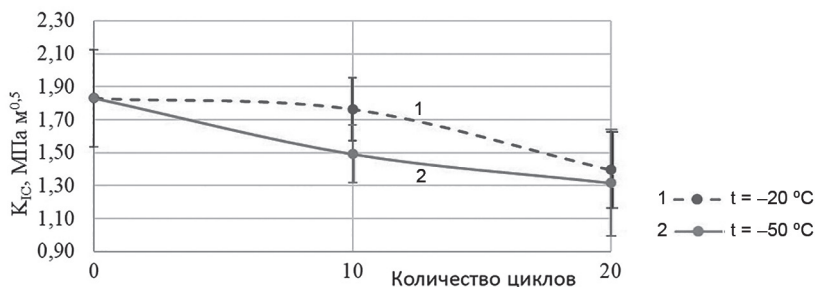


Рис. 5. Зависимость коэффициента трещиностойкости от количества циклов при разных температурах  
 Fig. 5. Dependence of the crack resistance coefficient on the number of cycles at different temperatures

### Результаты измерений и расчетов

В таблице приведены геометрические параметры некоторых исследуемых образцов, значения силы, при которых наблюдается разрушение, а также рассчитанные значения  $Y'$ , в соответствии с формулой (2) и полученные коэффициенты вязкости разрушения с использованием формулы (1) для образцов в исходном и водонасыщенном состояниях, а также после 10 и 20 циклов заморозки при температурах  $-20\text{ °C}$  и  $-50\text{ °C}$ . Из таблицы видно, что значения коэффициента трещиностойкости образцов в водонасыщенном состоянии в среднем на 6,2% ниже по отношению к результатам, полученным для образцов в исходном состоянии. Уменьшение значения коэффициента трещиностойкости для образцов, подверженных циклическому замораживанию, происходит на 10–31% в зависимости от температуры и количества циклов замораживания. Значения, полученные при одном режиме замораживания образцов, отобранных с разных глубин, отличаются не более чем на 3% и лежат в одном доверительном интервале. Полученные результаты подтверждаются снижением прочности на одноосное сжатие для водонасыщенных пород на 12%, для образцов после циклического замораживания — на 25%. Для наглядности результаты, приведенные в таблице, частично представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что наиболее сильно раз-

личие в величинах коэффициента трещиностойкости достигается при 10 циклах замораживания. Если замораживание происходило при  $-50\text{ °C}$ , то среднее значение вязкости разрушения оказалось на 15% меньше, чем при  $-20\text{ °C}$ .

### Заключение

Исследование процессов температурного выветривания выявило снижение вязкости разрушения горных пород. Образцы после 10 циклов замораживания при  $-20\text{ °C}$  показывают снижение коэффициента трещиностойкости на 9%, при 20 циклах — на 28%. Воздействие более высоких отрицательных температур оказывает еще большее влияние на снижение исследуемого параметра. Было получено, что воздействие 10 циклов при  $-50\text{ °C}$  снижает вязкость разрушения на 23%, 20 циклов при той же температуре — на 32%.

Таким образом, при расчете НДС массива горных пород, устойчивости бортов карьера и других конструкций необходимо учитывать, что при циклических процессах замораживания-оттаивания происходит снижение коэффициента трещиностойкости не менее чем на 20%.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ebrahimi R., Hosseini M., Taleb Beydokhti A.* Experimental study of effect of number of heating – cooling cycles on mode I and mode II fracture toughness of travertine // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 117, article 103185. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103185.
2. *Li M., Liu X., Pan Y., Qiao S., Hou Z., Hao Z.* Experimental studies on the effect of cyclic thermal shock and cooling methods on the mechanical properties and fracture behavior of prefabricated fissured sandstone // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 122 № 103576. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103576.
3. *Deng Z., Zhan X., Zeng W., Yang S., Wu J.* A degradation model of model fracture toughness of rock under freeze-thaw cycles // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 115, article 103073. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103073.
4. *Желнин М. С., Костина А. А., Плехов О. А., Семин М. А., Бровка Г. П.* Численный расчет бокового давления на внешнюю границу ледопородного ограждения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 10. – С. 62 – 77. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_62.
5. *Жуков В. С.* Оценка прочностных и упругих свойств горных пород дагинского горизонта шельфа Сахалина // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 4. – С. 44 – 57. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.
6. *Komolov V., Belikov A., Demenkov P.* Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «slurry wall» protection // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, vol. 180, pp. 313 – 323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8\_29.
7. *Dudchenko O. L., Shibaev I. A., Ivanov P. N., Kravcov A. N.* Development of geotechnical protective measures for strengthening a slope prone to landslide hazards / *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers*, 2018. 2019, pp. 147 – 152.
8. *Shibaev I. A., Sas I. E., Bagriantsev D. M., Dudchenko O. L.* Multivariate assessment of soil – building foundation interaction using PLAXIS software / *Advances in Science, Technology and Innovation*. 2018, pp. 341 – 343. DOI: 10.1007/978-3-030-01665-4\_79.
9. *Шibaев И. А., Сас И. Е., Черепецкая Е. Б., Багрянцев Д. М.* Обоснование возможных упрощений при оценке взаимодействия «грунт-основание» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 9. – С. 152 – 157. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-152-157.
10. *Шibaев 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.
11. *Прищепка Д. В.* Обоснование моделей напряженно-деформированного состояния трещиноватого породного массива // *Проблемы недропользования*. – 2017. – № 1. – С. 81 – 88. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.081.
12. *Sheshde E. A., Cheshomi A., Gharechelou S.* Estimation of mode I static fracture toughness of carbonate rock using small rock fragments // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022, vol. 218, article 110980. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110980.
13. *Курленя М. В., Миренков В. Е.* Влияние напряженно-деформированного состояния массива горных пород на направление развития трещин гидроразрыва // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 3. – С. 5 – 13. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-5-13.
14. *Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г., Кухтинский А. Э., Шустов Д. В.* О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 241. – С. 83 – 90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
15. *Kravcov A. N., Svoboda P., Pospchal V., Morozov D. V., Ivanov P. N.* Assessment of long-term strength of rocks // *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 62 – 64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.62.

16. Papanastasiou P. The effective fracture toughness in hydraulic fracturing // *International Journal of Fracture*. 1999, vol. 96, pp. 127 – 147. DOI: 10.1023/A:1018676212444.

17. Шибаев И. А., Винников В. А., Степанов Г. Д. Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 7. – С. 125 – 134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

18. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone // *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.

19. Sun D., Rao Q., Wang S., Shen Q., Yi W. Shear fracture (Mode II) toughness measurement of anisotropic rock // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 115, article 103043. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103043.

20. Wei M., Dai F., Xu N., Zhao T. Stress intensity factors and fracture process zones of ISRM-suggested chevron notched specimens for mode I fracture toughness testing of rocks // *Engineering Fracture Mechanics*. 2016, vol. 168, Part a, pp. 174 – 189. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.10.004.

21. Dai F., Xu Y., Zhao T., Xu N., Liu Y. Loading-rate-dependent progressive fracturing of cracked chevron-notched Brazilian disc specimens in split Hopkinson pressure bar tests // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 88, pp. 49 – 60. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.003.


22. Tutluoglu L., Keles C. Effects of geometric factors on mode I fracture toughness for modified ring tests // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012, vol. 51, pp. 149 – 161. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.02.004.

23. Amrollahi H., Baghbanan A., Hashemolhosseini H. Measuring fracture toughness of crystalline marbles under mode I and II and mixed mode I – II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011, vol. 48, no. 7, pp. 1123 – 1134. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.06.015.

24. Franklin J. A., Sun Zongqi, Atkinson B. K. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock // *International journal of rock mechanics and mining & geomechanics abstracts*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71 – 96.

25. Mostafavi M., McDonald S. A., Mummery P. M., Marrow T. J. Observation and quantification of three-dimensional crack propagation in poly-granular graphite // *Engineering Fracture Mechanics*. 2013, vol. 110, pp. 410 – 420. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.11.023.

26. Fowell R. J. Suggested method for determining mode I fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995, vol. 32, no. 1, pp. 57 – 64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U.

27. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, pp. 267 – 274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7. 

## REFERENCES

1. Ebrahimi R., Hosseini M., Taleb Beydokhti A. Experimental study of effect of number of heating – cooling cycles on mode I and mode II fracture toughness of travertine. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 117, article 103185. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103185.

2. Li M., Liu X., Pan Y., Qiao S., Hou Z., Hao Z. Experimental studies on the effect of cyclic thermal shock and cooling methods on the mechanical properties and fracture behavior of prefabricated fissured sandstone. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022, vol. 122, article 103576. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103576.



3. Deng Z., Zhan X., Zeng W., Yang S., Wu J. A degradation model of model fracture toughness of rock under freeze-thaw cycles. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 115, article 103073. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103073.
4. Zhelnin M. S., Kostina A. A., Plekhov O. A., Semin M. A., Brovka G. P. Numerical calculation of lateral pressure on frozen wall envelope. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 62 – 77. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_62.
5. Zhukov V. S. Estimating the strength and elasticity of rocks in the Dagi formation on the Sakhalin shelf. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 44 – 57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-44-57.
6. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on load-bearing constructions behavior during pit excavation under «slurry wall» protection. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, vol. 180, pp. 313 – 323. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8\_29.
7. Dudchenko O. L., Shibaev I. A., Ivanov P. N., Kravcov A. N. Development of geotechnical protective measures for strengthening a slope prone to landslide hazards. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers, 2018*. 2019, pp. 147 – 152.
8. Shibaev I. A., Sas I. E., Bagriantsev D. M., Dudchenko O. L. Multivariate assessment of soil – building foundation interaction using PLAXIS software. *Advances in Science, Technology and Innovation*. 2018, pp. 341 – 343. DOI: 10.1007/978-3-030-01665-4\_79.
9. Shibaev I. A., Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Bagryantsev D. M. Substantiation of possible simplifications in soil – foundation interaction estimate. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 9, pp. 152 – 157. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-152-157.
10. Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static elasticity modules 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.
11. Prishchepa D. V. Substantiation of models of the stress-strain state of a fractured rock mass. *Problems of Subsoil Use*. 2017, no. 1, pp. 81 – 88. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.081.
12. Sheshde E. A., Cheshomi A., Gharechelou S. Estimation of mode I static fracture toughness of carbonate rock using small rock fragments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022, vol. 218, article 110980. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110980.
13. Kurlenya M. V., Mirenkov V. E. Influence of rock mass stress state on propagation direction of hydraulic fractures. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 3, pp. 5 – 13. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-5-13.
14. Kashnikov Yu. A., Ashikhmin S. G., Kukhtinsky A. E., Shustov D. V. On the relationship of crack resistance coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 83 – 90. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
15. Kravcov A. N., Svoboda P., Pospchal V., Morozov D. V., Ivanov P. N. Assessment of long-term strength of rocks. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 62 – 64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.62.
16. Papanastasiou P. The effective fracture toughness in hydraulic fracturing. *International Journal of Fracture*. 1999, vol. 96, pp. 127 – 147. DOI: 10.1023/A:1018676212444.
17. Shibaev I. A., Vinnikov V. A., Stepanov G. D. Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 125 – 134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.
18. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.
19. Sun D., Rao Q., Wang S., Shen Q., Yi W. Shear fracture (Mode II) toughness measurement of anisotropic rock. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021, vol. 115, article 103043. DOI: 10.1016/j.tafmec.2021.103043.

20. Wei M., Dai F., Xu N., Zhao T. Stress intensity factors and fracture process zones of ISRM-suggested chevron notched specimens for mode I fracture toughness testing of rocks. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016, vol. 168, Part a, pp. 174–189. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.10.004.
21. Dai F., Xu Y., Zhao T., Xu N., Liu Y. Loading-rate-dependent progressive fracturing of cracked chevron-notched Brazilian disc specimens in split Hopkinson pressure bar tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 88, pp. 49–60. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.003.
22. Tutluoglu L., Keles C. Effects of geometric factors on mode I fracture toughness for modified ring tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012, vol. 51, pp. 149–161. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.02.004.
23. Amrollahi H., Baghbanan A., Hashemolhosseini H. Measuring fracture toughness of crystalline marbles under mode I and II and mixed mode I–II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011, vol. 48, no. 7, pp. 1123–1134. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.06.015.
24. Franklin J. A., Sun Zongqi, Atkinson B. K. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International journal of rock mechanics and mining & geomechanics abstracts*. 1988, vol. 25, no. 2, pp. 71–96.
25. Mostafavi M., McDonald S. A., Mummery P. M., Marrow T. J. Observation and quantification of three-dimensional crack propagation in poly-granular graphite. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013, vol. 110, pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.11.023.
26. Fowell R. J. Suggested method for determining mode I fracture toughness using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995, vol. 32, no. 1, pp. 57–64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U.
27. Kuruppu M. D., Obara Y., Ayatollahi M. R., Chong K. P., Funatsu T. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014, vol. 47, pp. 267–274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черепецкая Елена Борисовна<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: eb.cherepetskaya@misis.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9642-2149,

Безруков Вадим Игоревич<sup>1</sup> — студент,  
e-mail: bezrukov.vi@misis.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6081-6616,

<sup>1</sup> ГИ НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Безруков В.И., e-mail: bezrukov.vi@misis.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.B. Cherepetskaya<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: eb.cherepetskaya@misis.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9642-2149,

V.I. Bezrukov<sup>1</sup>, Student, e-mail: bezrukov.vi@misis.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6081-6616,

<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science  
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V.I. Bezrukov, e-mail: bezrukov.vi@misis.ru.

Получена редакцией 08.11.2022; получена после рецензии 18.11.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 08.11.2022; received after the review 18.11.2022; accepted for printing 10.12.2022.