

Исследование масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород методом конечно-дискретных элементов в программном комплексе PROROCK 2.0

А. К. Кирсанов[✉], А. С. Ткаченко, С. А. Богомолов

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Российская Федерация

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

Резюме. Представлены результаты численного моделирования исследования масштабного эффекта при одноосном сжатии однородных горных пород с использованием специализированного программного комплекса PROROCK 2.0, реализующего метод конечно-дискретных элементов. Целью работы являлось определение закономерностей изменения прочностных характеристик пород в зависимости от размеров образца при сохранении физико-механических свойств и условий нагружения. Моделирование выполнялось для двух горных пород: мрамора и базальта. Полученные зависимости выявили снижение прочности с увеличением размеров образца, что указывает на проявление масштабного эффекта. Установлено, что разрушение носит хрупкий характер. Результаты работы показывают степень проявления масштабного эффекта и необходимость его учета при переходе от лабораторных экспериментов к инженерным расчетам устойчивости массивов горных пород.

Ключевые слова: прочность горных пород, одноосное сжатие, метод конечно-дискретных элементов, разрушение пород, масштабный эффект

Благодарность: Авторы выражают благодарность компании ООО «Скиентия» за предоставленное программное обеспечение PROROCK, а также консультационную и методическую поддержку, оказанную при выполнении настоящего исследования.

Для цитирования: Кирсанов А.К., Ткаченко А.С., Богомолов С.А. Исследование масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород методом конечно-дискретных элементов в программном комплексе PROROCK 2.0. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (3): 56-61. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-56-61>.

Study of scale effect under uniaxial compression of rocks using the finite-discrete element method in the «PROROCK 2.0» software

A. K. Kirsanov[✉], A. S. Tkachenko, S. A. Bogomolov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ AKirsanov@sfu-kras.ru

Abstract. The paper presents the results of numerical modeling of the scale effect under uniaxial compression of homogeneous rock samples using the specialized software package PROROCK 2.0, which implements the finite-discrete element method. The aim of the study was to determine the patterns of variation in the strength characteristics of rocks depending on specimen size while maintaining identical physical and mechanical properties and loading conditions. The simulations were carried out for two types of rocks – marble and basalt. The obtained relationships revealed a decrease in strength with increasing specimen size, indicating the presence of a scale effect. It was established that the failure mechanism is brittle in nature. The results demonstrate the extent of the scale effect and highlight the necessity of accounting for it when transitioning from laboratory experiments to engineering calculations of rock mass stability.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to LLC «Scientia» for providing the PROROCK software, as well as for the consulting and methodological support provided during the course of this study.

Keywords: rock strength, uniaxial compression, finite-discrete element method, rock failure, scale effect

For citation: Kirsanov A.K., Tkachenko A.S., Bogomolov S.A. Study of scale effect under uniaxial compression of rocks using the finite-discrete element method in the «PROROCK 2.0» software. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (3): 56-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-3-56-61>.

Введение

Исследование прочностных свойств и механизмов разрушения горных пород при различных масштабах нагружения является одной из ключевых задач современной геомеханики [1–4]. От того, насколько достоверно определены данные параметры, зависит точность расчетов устойчивости откосов бортов карьеров, подземных горных выработок, массивов пород, а также корректность прогноза деформационно-прочностных характеристик при проектировании горнотехнических сооружений.

При решении большинства инженерно-геомеханических задач исходными параметрами служат результаты лабораторных испытаний образцов горных пород. Однако опыт эксплуатации горных предприятий показывает, что значения прочности и деформируемости, определенные по результатам испытаний образцов малого размера, часто оказываются выше, чем фактические характеристики породного массива. Вследствие этого при инженерных расчетах, основанных на лабораторных данных, модели устойчивости горных выработок и откосов могут давать завышенную оценку предельных нагрузок и устойчивого состояния массива, особенно при сложном напряженно-деформированном состоянии пород [5–7].

Основной причиной таких расхождений является неоднородность горного массива: наличие в нем трещин, прослоек и структурных дефектов, отсутствующих в лабораторных образцах. С увеличением объема исследуемого материала возрастает вероятность присутствия таких дефектов, что закономерно снижает их прочность. Таким образом, механические свойства горных пород оказываются зависимыми не только от их минерального состава и структуры, но и от масштаба (размеров) рассматриваемого объема, что подтверждается рядом теоретических и экспериментальных работ [7–11].

Такое явление называют *масштабным эффектом*. Суть его в том, что прочность и особенности деформирования горной породы меняются в зависимости от размеров образца или расчетной области. Поэтому при переходе от лабораторных испытаний к условиям реального массива этот фактор обязательно нужно учитывать, чтобы корректно использовать полученные параметры в геомеханических расчетах.

Масштабный эффект в природных массивах в первую очередь обусловлен их неоднородным строением и наличием различных дефектов. Вместе с тем его проявление возможно и в образцах, где отсутствуют заметные трещины или другие структурные нарушения.

На настоящий момент известно несколько гипотез, объясняющих закономерное снижение прочности материала при увеличении образца или расчетной области. Среди них можно выделить теорию распределения Вейбулла [12], где вероятность разрушения определяется статистическим распределением дефектов. Согласно данной теории, с увеличением размера образца возрастает вероятность наличия критического дефекта, способного инициировать разрушение. Также стоит отметить теорию Бажанта [13], ее основная идея заключается в том, что разрушение – процесс энергетический. При увеличении размеров образца масштаб взаимодействия и геометрических границ изменяет эффективную прочность. Кроме них существуют: теория масштабного разрушения [14] – поверхность разрушения обладает фрактальной структурой, а эффективная энергия разрушения и прочность за-

висят от фрактальной размерности; и гранично-эффектная теория [15] – масштабный эффект связан не с размером образца, а с взаимодействием зоны разрушения с ближайшей геометрической границей образца. Размер зоны разрушения остается постоянным, но доля этой зоны по отношению к размеру образца уменьшается.

В настоящем исследовании рассматривается влияние масштабного эффекта на прочностные характеристики горных пород при одноосном сжатии для идеализированной однородной среды, в которой отсутствуют трещины и структурные неоднородности. Численные эксперименты выполнены в программном комплексе PROROCK 2.0 для серии образцов с размерами (от 20 до 220 мм), что позволило выявить закономерность изменения предельных нагрузок и напряжений разрушения в зависимости от размера образца.

Цель исследования: установить закономерности проявления масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород в условиях однородной среды, а также определить механическую природу изменения их прочностных характеристик с увеличением размера образца.

Методология

Моделирование с использованием метода конечно-дискретных элементов, реализованного в программном комплексе PROROCK 2.0, предоставляет возможность явно воспроизводить процессы деформирования и разрушения, что делает возможным исследование масштабного эффекта.

В основе метода моделирования лежит представление материала в виде совокупности конечных элементов, соединенных связующими элементами (рис. 1а). При достижении предельных напряжений в связях реализуется разрыв сплошности, что обеспечивает явное моделирование процесса разрушения (рис. 1б).

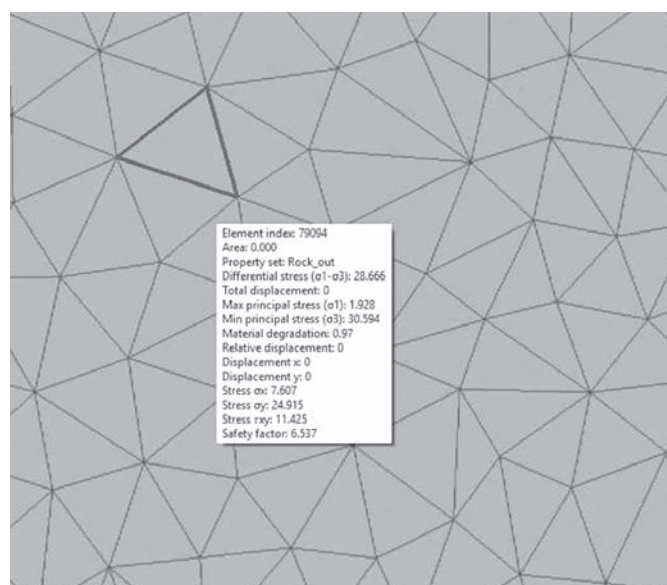
Расчеты проводились в двумерной среде (2D), что соответствует рассмотрению поперечного сечения цилиндрического образца при одноосном сжатии. Чтобы исключить влияние случайной неоднородности структуры, применялись условно однородные и изотропные модели без исходных трещин с заданными параметрами. Такой подход позволил сосредоточиться именно на проявлении масштабного эффекта, не учитывая влияние анизотропии или возможных геометрических несовершенств.

Геометрия модели представляла собой цилиндр высотой, равной двум диаметрам образца. Таким образом, сохранялось соотношение $h / d = 2$. Диаметр образцов варьировался в диапазоне 20–220 мм: 20, 30, 40, 50, 60, 100, 150 и 220 мм. Верхняя плоскость образца нагружалась равномерно движущейся плитой пресса с постоянной скоростью, равной 0,01 м/с. На контакте между плитой пресса и плоскостью образца было задано условие как между сталью и горной породой. Это было реализовано с помощью свойства трещины (рис. 2).

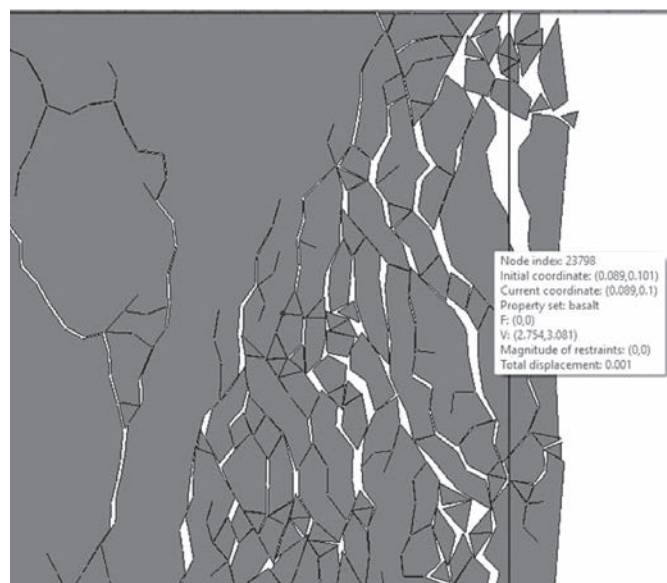
Для моделирования использовались параметры, соответствующие типичным значениям для **мрамора** и **базальта** (табл. 1).

Для каждого из образцов (всего было 16 шт.) выполнено моделирование испытаний на одноосное сжатие, при которых были заданы идентичные условия (табл. 1). Трещиноватость и другая структурная неоднородность не задавалась с целью получения оценки масштабного эффекта без влияния вторичных факторов.

Основным результатом проведенного моделирования стало получение зависимостей «напряжение – деформация». Полученные данные приведены к единой системе координат и использованы для построения зависимости прочности образца от его размера, отражающей проявление масштабного эффекта.



(a)



б (b)

Рис. 1. Отображение элементов до нарушения сплошности и после /
Fig. 1. Element's display before destruction and after

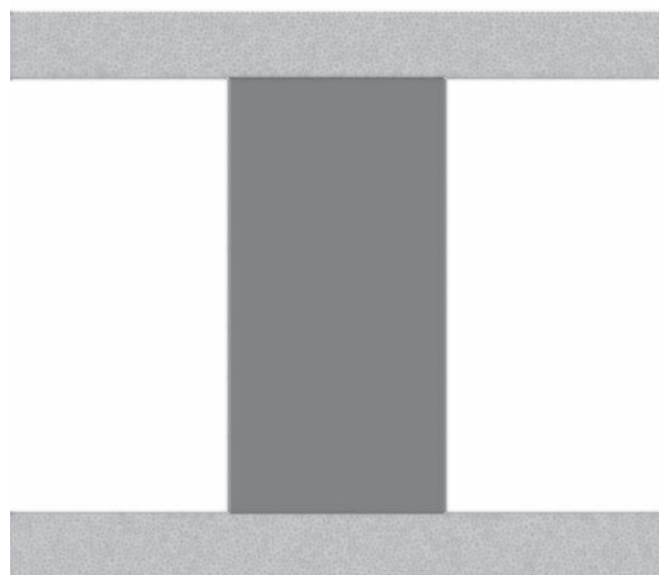
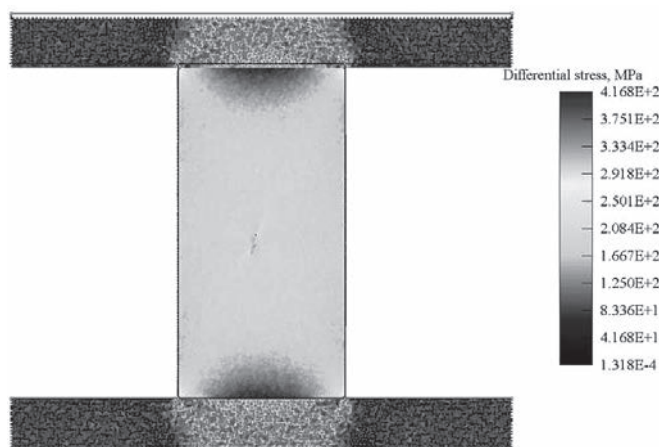


Рис. 2. Геометрическая модель образца d = 100 мм и схемы его нагружения в программном комплексе PROROCK 2.0 /

Fig. 2. Geometric model of a sample d=100 mm and its loading diagram in «PROROCK 2.0» software

В процессе моделирования регистрировались следующие параметры:

- распределение напряжений и деформаций по всему образцу (рис. 3а);
- величина вертикального перемещения нагружающей плиты;
- момент наступления предельного состояния (максимальное напряжение), когда образец разрушается (рис. 3б).



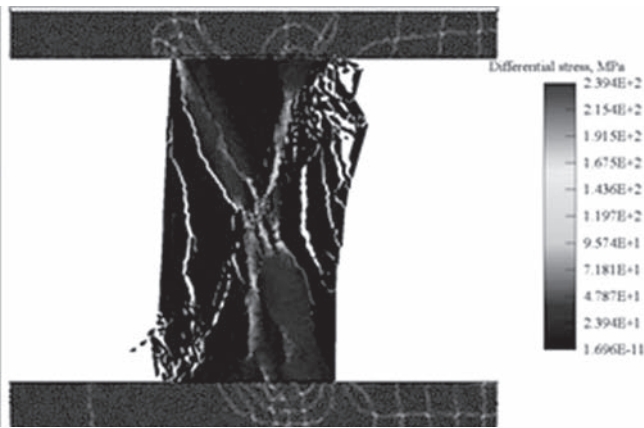
а (a)

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические свойства пород, используемых при моделировании /
Physical and mechanical properties of rocks used in modeling

Материал / Name of material	Основные свойства / Main properties												
	ρ	E	V	VD	C	φ	UTS	φ'	Sp/h	Sr/Sp	Op/h	Or/Op	PP
Мрамор / Marble	2 690	45	0,35	10 000	32	38	8	38	0,00125	15	0,0002	5	450
Базальт / Basalt	3 000	50	0,25	8 000	44	42	20	42	0,00125	15	0,0002	5	500

Примечание: ρ – плотность, кг/м³; E – модуль Юнга, ГПа; V – коэффициент Пуассона; VD – вязкостное демпфирование; C – сцепление, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.; UTS – предел прочности на растяжение, МПа; φ' – угол внутреннего трения, град. Sp/h – относительное пиковое скольжение; Sr/Sp – относительное скольжение вниз; Op/h – относительное максимальное раскрытие; Or/Op – относительное разрывное открытие; PP – параметры штрафа, ГПа.



б (b)

Рис. 3. Поля дифференциальных напряжений в образце при одноосном сжатии: а – до разрушения; б – после разрушения / Fig. 3. Differential stress fields in the sample under uniaxial compression: a – before destruction; b – after destruction

Результаты и обсуждение

По результатам расчетов для каждого образца были построены диаграммы деформирования, показывающие, как меняется его поведение при увеличении нагрузки (рис. 4).

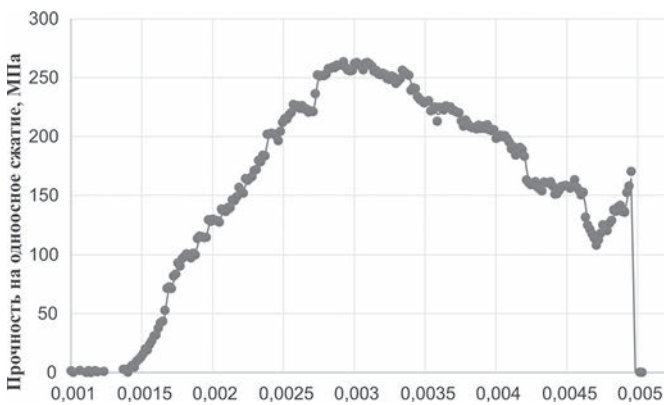


Рис. 4. Диаграмма деформирования образца (на примере мрамора d = 50 мм) / Fig. 4. Deformation dependency of specimen (for example a marble with diameter of 50 mm)

Во всех рассмотренных случаях процесс деформирования протекал по сходной схеме:

- на начальном этапе наблюдалась линейно-упругая зависимость при малых деформациях;
- затем происходило накопление микродеформаций, сопровождающееся некоторым снижением жесткости;
- далее достигалось максимальное напряжение, после чего происходили разрушение и потеря несущей способности.

Поскольку в моделях использовались однородные образцы без начальной трещиноватости, разрушение имело хрупкий характер и происходило практически без стадии пластического течения.

В ходе серии моделирования были определены максимальные нормальные напряжения, соответствующие моменту разрушения (рис. 5).

Для обоих материалов установлено, что с увеличением размеров образца наблюдается снижение пикового напряжения, что свидетельствует о проявлении масштабного эффекта.

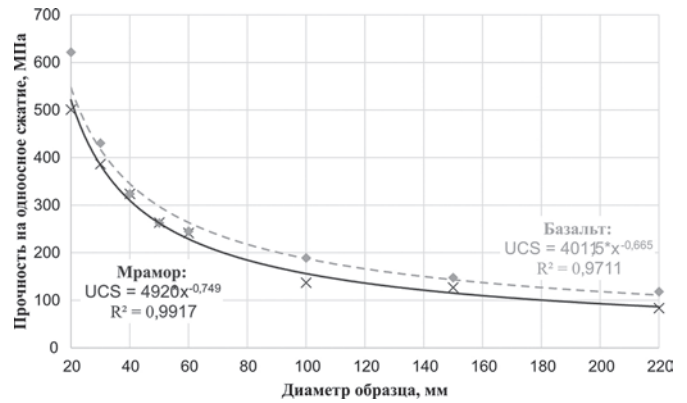


Рис. 5. Зависимость прочности образцов при одноосном сжатии / Fig. 5. Dependence of uniaxial compressive strength on sample size for marble and basalt

В ходе серии моделирования были определены максимальные нормальные напряжения, соответствующие моменту разрушения (рис. 5). Для обоих материалов установлено, что с увеличением размеров образца наблюдается снижение пикового напряжения, это свидетельствует о проявлении масштабного эффекта.

Такое поведение согласуется с известными экспериментальными данными и теоретическими представлениями о масштабном эффекте [16–19]. На малых размерах образцов материал ведет себя как условно однородный и демонстрирует наибольшие значения прочности, тогда как при увеличении расчетного объема возрастает влияние геометрических факторов, приводящих к снижению эффективной несущей способности.

Результаты моделирования были сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты замера прочности образцов при их различных диаметрах и однородной структуре / Results of strength measurements for specimens with different diameters and homogeneous structure

Диаметр образца, мм / Specimen diameter, mm	Предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа / Uniaxial compressive strength of rocks, MPa	
	Мрамор / Marble	Базальт / Basalt
20	501	622
30	387	430
40	324	324
50	264	263
60	242	245
100	137	189
150	127	148
220	84	118

Во всех моделях разрушение начиналось в центральной части образца и развивалось в виде диагональных сдвигов к границам образца, направление развития трещин – вдоль направления нагружения. При увеличении диаметра образца наблюдалось расширение зоны разрушения и уменьшение концентрации напряжений.

Обработка результатов моделирования позволила установить следующие закономерности:

1. Для мрамора установлено, что при увеличении диаметра образцов с 20 до 220 мм отмечается существенное снижение прочностных характеристик – прочность уменьшается примерно на 83 %.

2. Для образцов из базальта получена похожая картина – при том же размере образцов было зафиксировано снижение прочности на 81 %.

Полученные зависимости, которые описывают характер изменения прочностных параметров, могут быть представлены в виде следующих выражений:

– для мрамора:

$$UCS = 4920 d^{-0.749}, \quad (1)$$

– для базальта:

$$UCS = 4011,5 d^{-0.665}, \quad (2)$$

где UCS – предел прочности образца на одноосное сжатие (Uniaxial Compressive Strength), МПа; d – диаметр образца, мм.

Результаты выполненного моделирования свидетельствуют о наличии выраженного масштабного эффекта при одноосном сжатии горных пород (мрамора и базальта).

Заключение

1. Проведенное моделирование в ПК PROROCK 2.0 показало, что явление масштабного эффекта существенно влияет на прочностные характеристики горных пород (мрамора и базальта) при одноосном сжатии. При этом проявление данного эффекта возможно даже в условиях идеализированной монолитной и однородной структуры массива.

2. Полученные результаты моделирования для однородных пород (мрамора и базальта) показали следующие закономерности:

- прочностные характеристики горных пород снижаются с увеличением размеров испытываемых образцов;
- наиболее интенсивное снижение прочности зафиксировано в образцах малых размеров;
- по мере увеличения образцов масштабный эффект ослабевает.

3. Во всех рассмотренных случаях разрушение образцов носило хрупкий характер, при этом зона повреждения становилась более протяженной и менее концентрированной.

4. Полученные в результате моделирования зависимости (1 и 2) выявлены для однородной структуры (без трещин и других дефектов).

Выводы

1. В работе представлены результаты численного моделирования исследования масштабного эффекта при одноосном сжатии однородных горных пород с использованием специализированного программного комплекса PROROCK 2.0, реализующего метод конечно-дискретных элементов.

2. Результаты исследований могут быть полезными для учета масштабного эффекта при переходе от прочностных характеристик лабораторных образцов к расчетным параметрам породного массива, а также могут быть использованы при калибровке геомеханических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Choo J., Sun Y., Fei F. Size effects on the strength and cracking behavior of flawed rocks under uniaxial compression: from laboratory scale to field scale. *Acta Geotechnica*. 2023; 18 (7): 3451-3468. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01806-7>.
2. Hu C., Li X., Wu Y., et al. Experimental and numerical investigation on mechanical and fracture characteristics of jointed rock with varying roughness. *Journal of Safety and Sustainability*. 2025; 2 (1): 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.12.001>.
3. Chen Y., Sheng B., Xie S., et al. Crack propagation and scale effect of random fractured rock under compression-shear loading. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 23: 5164-5180. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.104>.
4. Zhao L.-Y., Ren L., Niu F.-J., et al. Estimation of elastic properties and failure strength of layered rocks with a multi-scale damage approach. *International Journal of Plasticity*. 2023; 168: 103681. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103681>.
5. Королев В.А. Теоретическая оценка масштабного эффекта в дисперсных грунтах. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2017; 6: 77-86.
Korolev V.A. Theoretical assessment of size effect in dispersed soils. *Moscow University Geology Bulletin*. 2017; 6: 77-86. (In Russ.).
6. Шутов В.А., Миренков В.Е. Расчет деформирования и масштабный фактор в задачах геомеханики. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018; 5: 239-244. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-5-239-244>.
Shutov V.A., Mirenkov V.E. Deformation analysis and size factor in geomechanics problems. *InterExpo Geo-Siberia*. 2018; 5: 239-244. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-5-239-244>. (In Russ.).
7. Супрун В.И., Левченко Я.В., Колотовкин А.С., Ворошилин К.С. Влияние масштабного фактора на прочность горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2023; 10: 5-19. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_5.
Suprun V.I., Levchenko Ya.V., Kolotovkin A.S., Voroshilin K.S. Influence of size effect on rock strength. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 10: 5-19. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_10_0_5. (In Russ.).
8. Ильницкая Е.И. Влияние масштабного фактора на прочностные свойства горных пород. *Физико-механические свойства, давление и разрушение горных пород*. Москва, 1972. С. 17-24.
Il'nitskaya E.I. Influence of size effect on the strength properties of rocks. *Physical and mechanical properties, pressure and destruction of rocks*. Moscow, 1972: 17-24. (In Russ.).
9. Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях. *Проблемы механизации горных работ*. Москва, 1963: 39-56.
Koifman M.I. The principal size effect in rocks and coals. *Problems of mechanization of mining operations*. Moscow, 1963: 39-56. (In Russ.).
10. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Кузель С.В. Масштабный эффект в горных породах. Донецк, 2004: 132.
Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A., Kuzhel S.V. Size effect in rocks. Donetsk, 2004: 132 (In Russ.).
11. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavation in Rock. *Institution of Mining and Metallurgy*. 1980: 527.
12. Lobo-Guerrero S., Vallejo L. Application of Weibull statistics to the tensile strength of rock aggregates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006; 132 (6): 786-794. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:6\(786\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:6(786)).
13. Bažant Z.P. Concrete fracture models: testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002; 69: 165-205. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00084-4).

14. Carpinteri A. Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mechanics of Materials*. 1994. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)00008-5](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00008-5).
15. Wu X., Tao M., Yang Z., et al. Stress migration and failure mechanisms of rocks with holes under gradient stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2025; 195: 106306. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106306>.
16. Komurlu E. Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *Geo-Engineering*. 2018; 9: 17. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>.
17. Hu Z., Xie L., Qin Y., et al. Numerical simulation of size effect of defective rock under compression condition. *Scientific Reports*. 2023; 13: 420. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27651-y>.
18. Латышев О.Г., Прищепа Д.В. Учет масштабного эффекта при проектировании параметров горной технологии. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017; 1 (45): 59-61. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-59-61>.
Latyshev O.G., Prishchepa D.V. Consideration of the scale effect in designing mining technology parameters. *News of the Ural State Mining University*. 2017; 1 (45): 59-61. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-59-61>. (In Russ.).
19. Volonté G., Stenebraten J., Papamichos E. Effect of specimen size and shape on the mechanical properties measured on plugs subsampled from sidewall cores. *E3S Web of Conferences*. 2023; 366. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336601014>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Александр Константинович Кирсанов –
канд. техн. наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»,
г. Красноярск, Российская Федерация;
e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

Aleksandr K. Kirsanov –
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian
Federal University, Krasnoyarsk, Russian
Federation; e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru



Александр Сергеевич Ткаченко –
студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск, Российская
Федерация

Aleksandr S. Tkachenko –
Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk,
Russian Federation



Степан Александрович Богомолов –
студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск, Российская
Федерация

Stepan A. Bogomolov
Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk,
Russian Federation

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.03.2026
Поступила после рецензирования: 10.05.2026
Принята к публикации: 24.05.2026

Article info

Received: 27.03.2026
Revised: 10.05.2026
Accepted: 24.05.2026