

Оценка коэффициента жесткости трещин по результатам лабораторных испытаний образцов уррита Хибинского массива

С.В. Дмитриев ✉, Н.Н. Кузнецов

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ s.dmitriev@ksc.ru

Резюме: Представлены результаты экспериментальных исследований нормальной и тангенциальной жесткости искусственных трещин в образцах керна, отобранных с месторождений Хибинского массива. В ходе испытаний, выполненных с использованием автоматизированного комплекса «АСИС» по методике постоянной нормальной нагрузки, выявлены закономерности изменения жесткости трещин в зависимости от уровня нагрузки и геометрии образцов. Установлено, что с ростом нормального давления происходит перераспределение механических характеристик контакта, что связано с изменением шероховатости и частичным разрушением берегов трещины. Наиболее устойчивые и представительные данные получены на начальных этапах нагружения. Определены усреднённые значения жесткости, которые могут служить основой для численного моделирования трещиноватых массивов, в том числе при использовании метода конечных элементов. Результаты имеют прикладное и фундаментальное значение для оценки устойчивости горных пород и прогнозирования их поведения в условиях разработки месторождений.

Ключевые слова: нормальная жесткость, тангенциальная жесткость, лабораторные испытания, коэффициент жесткости, трещина, образец

Благодарности: Авторы выражают благодарность ведущему инженеру лаборатории инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ А.К. Паку за проведение лабораторных испытаний.

Для цитирования: Дмитриев С.В., Кузнецов Н.Н. Оценка коэффициента жесткости трещин по результатам лабораторных испытаний образцов уррита Хибинского массива. *Горная промышленность*. 2026;(2):200–205. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-200-205>

Assessment of the fracture stiffness coefficient based on laboratory testing of urtite core samples from the Khibiny massif

S.V. Dmitriev ✉, N.N. Kuznetcov

Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ s.dmitriev@ksc.ru

Abstract: This paper presents experimental research results on normal and shear stiffness of artificial fractures in core samples collected from deposits in the Khibiny massif. Tests were carried out using the automated ASIS testing system under the constant normal load procedure. The experiments revealed dependencies of the fracture stiffness on the applied load and the core sample geometry. It was established that increasing normal stress leads to redistribution of the mechanical contact characteristics due to changes in the surface roughness and partial damage of the fracture edges. The most stable and representative data were obtained during the initial stages of loading. The average stiffness values were determined, which can serve as the input parameters for numerical modeling of the fractured rock masses, including the finite elements methods. The findings have practical relevance for assessing rock mass stability and predicting rock behavior under mining conditions.

Keywords: normal stiffness, shear stiffness, laboratory testing, stiffness coefficient, fracture, core sample

Acknowledgments: The authors express their gratitude to A.K. Pak, Senior Engineer at the Laboratory of Instrumental Investigations of Rock Mass State in the Arctic Zone of the Russian Federation, for conducting the laboratory tests.

For citation: Dmitriev S.V., Kuznetcov N.N. Assessment of the fracture stiffness coefficient based on laboratory testing of urtite core samples from the Khibiny massif. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):200–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-200-205>

Введение

В условиях возрастающей сложности ведения горных работ, связанных с их углублением, действием тектонических напряжений и рядом других влияющих факторов, актуальной задачей становится прогнозирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород [1; 2]. Для решения этой задачи необходимо изучать сдвиговые процессы, происходящие по плоскостям структурных неоднородностей, а также оценивать НДС массива, основываясь на результатах натурных исследований и численного моделирования. Сдвиговые процессы, обусловленные совместным действием гравитационных и тектонических напряжений, играют определяющую роль в формировании устойчивости блоковых структур нарушенного массива. Для повышения точности и надежности результатов численного моделирования НДС необходимо учитывать не только прочностные и деформационные свойства вмещающих пород, но и контактные характеристики межблоковых интерфейсов [3]. Это требует интеграции в расчёты механических параметров трещин и разломов, что особенно критично в условиях действия тектонических напряжений вблизи активных разломов.

Нормальная и тангенциальная жёсткость трещины – это фундаментальные параметры, описывающие сопротивление контакта между берегами трещины деформациям в направлении, перпендикулярном (нормальном) и параллельном (тангенциальном) плоскости разрыва. Физически нормальная жёсткость k_n отражает способность контакта воспринимать сжатие или раскрываться под действием нормальных напряжений, тогда как тангенциальная (сдвиговая) жёсткость k_s характеризует сопротивление смещению берегов друг относительно друга при приложении касательных усилий [4]. Эти величины определяются не только механическими свойствами самих пород, но и геометрией поверхности трещины – её шероховатостью, наличием заполнителя и степенью смыкания.

В численном моделировании объёмные элементы горной породы описываются через классические упругие константы – модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν , которые в совокупности с функцией формы элемента определяют его деформационную жёсткость. Аналогичным образом для моделирования разрывных неоднородностей (трещин, разломов, контактов блоков) вводятся контактные элементы, предложенные Р. Гудманом и соавторами [5]. Такой элемент не обладает объёмом, но связывает два соседних блока и характеризуется вышеупомянутыми нормальной и тангенциальной жёсткостью, которые играют роль интерфейсных упругих констант. Таким образом, если модуль Юнга характеризует способность материала деформироваться под действием нагрузки, то нормальная и тангенциальная жёсткость показывает, насколько «податлив» будет сам контакт между блоками. Это позволяет корректно передать локальное поведение разломных зон в рамках глобальной модели, особенно в условиях, когда смещения вдоль трещин доминируют над объёмной деформацией массива.

Материалы и методы

Деформационные характеристики нарушенного массива горных пород в значительной степени зависят от геометрических и механических характеристик трещин [6]. Тангенциальная и нормальная жесткости трещин не только являются одними из основных факторов в численном анализе неоднородностей, но и могут быть использованы

в расчете упругих характеристик замещающего разлом материала при моделировании методом конечных элементов.

С целью определения значений нормальной и тангенциальной жесткостей отобран керн уртыта среднезернистого массивного с месторождений Хибинского массива. Участки отобранного керна содержали искусственные трещины, ориентированные под углами 58–86° относительно его оси. Для проведения испытаний изготавливали образцы таким образом, чтобы плоскость трещины совпадала с плоскостью сдвига (рис. 1).



Рис. 1
Образцы уртыта, подготовленные для проведения испытаний на сдвиг по трещине

Fig 1
Urtite core samples prepared for shear testing along the fracture

Испытания образцов уртыта на сдвиг по трещине выполняли на автоматизированном комплексе «АСИС» в режиме постоянной нормальной нагрузки (Constant Normal Loading, CNL). Процесс нагружения осуществлялся в несколько этапов с пошаговым увеличением нормальной нагрузки от 1,0 до 3,5 МПа [7; 8]. По результатам испытаний строили графики зависимости деформаций от приложенных нормальных и сдвиговых нагрузок (рис. 2).

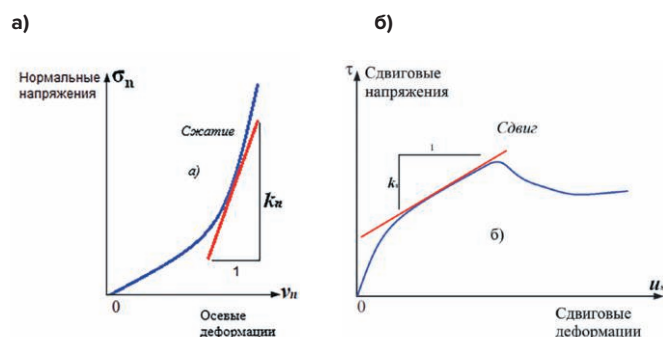


Рис. 2
Графики деформирования образцов при сдвиге со сжатием по трещине: а – на этапе создания нормальной нагрузки; б – на этапе сдвига

Fig. 2
Deformation curves of core samples during the shear with compression along the fracture: а – during application of the normal load; б – during the shear stage

К данным графикам строятся касательные, углы наклона которых характеризуют нормальную и тангенциальную жесткость трещин [6]:

$$k_s = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta u_s}; \quad k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta v_n}, \quad (1)$$

где k_s – тангенциальная жесткость контакта; k_n – нормальная жесткость контакта; $\Delta\sigma_s$ – касательные напряжения; $\Delta\sigma_n$ – нормальные напряжения; Δu_s – сдвиговые деформации; Δv_n – осевые деформации.

Результаты и их обсуждение

Ниже представлены характеристика исследуемых образцов уррита и результаты испытаний на сдвиг со сжатием по трещине.

Образец №4 (рис. 3) характеризуется следующими параметрами:

1. Угол наклона трещины относительно оси керна: 77°.
2. Диаметр керна: 45,0 мм.
3. Длина образца: 113,8 мм.
4. Геологическое описание: уррит среднезернистый массивный.
5. Состав:
 - нефелин – 70–85%, среднезернистый, цвет мутновато-серый, блеск жирный;
 - пироксенит – 10–20%, среднезернистый, цвет черный, блеск стеклянный, волокнистый, спайность средняя, излом неровный;
 - сфен – 5–10%, зернистой массы, мелкозернистый, цвет коричневый, блеск стеклянный.

Для остальных исследуемых образцов уррита среднезернистого массивного отклонение в значениях диаметра и высоты от образца №4 не превышало 1%, а содержание нефелина, пироксенита и сфена в целом также соответствовало указанным выше диапазонам. Главным отличием являлось изменение ориентации трещин относительно оси керна от 58 до 86°.



Рис. 3
Образец уррита среднезернистого массивного (№4)

Fig. 3
A core sample of medium-grained solid urtite (No. 4)

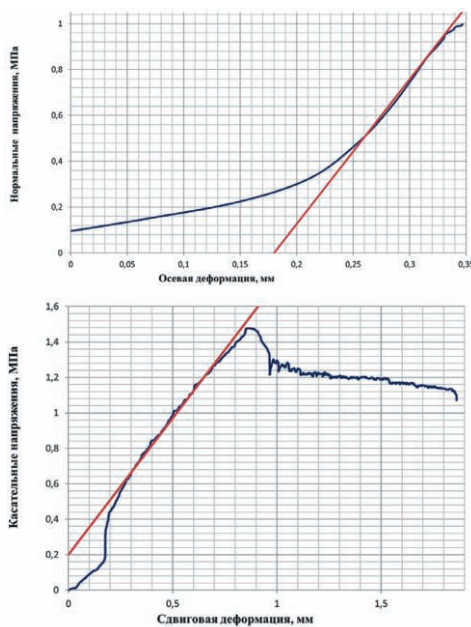


Рис. 4
Этап №1, нормальная нагрузка 1,0 МПа

Fig. 4
Stage No.1, normal load of 1,0 MPa

На примере образца уррита №4 рассмотрим полученные графики деформирования (рис. 4–6). На первом этапе испытаний при нормальной нагрузке 1,0 МПа получены следующие результаты.

В этом случае (см. рис. 4) значения нормальной и тангенциальной жесткостей трещины равны:

$$k_n = \tan(81^\circ) = 6.31 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}};$$

$$k_s = \tan(57^\circ) = 1.54 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}.$$

Отношение нормальной к тангенциальной жесткости (k_n/k_s) составляет 4,1.

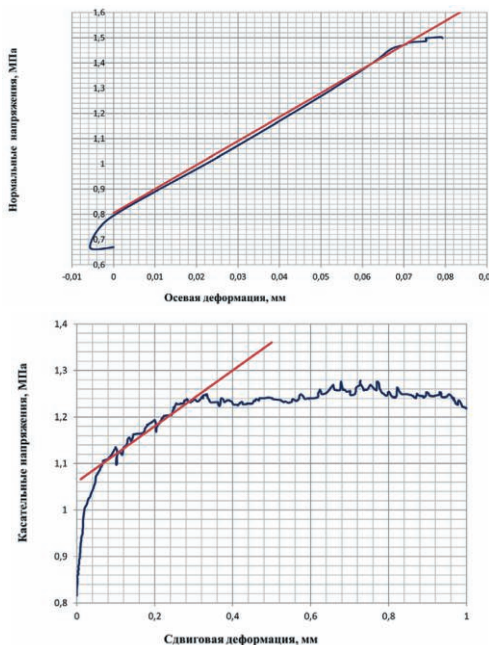


Рис. 5
Этап №2, нормальная нагрузка 1,5 МПа

Fig. 5
Stage No. 2, normal load of 1.5 MPa

На втором этапе нагружения (см. рис. 5) значения нормальной и тангенциальной жесткостей трещин равны:

$$k_n = \tan(84^\circ) = 9.51 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}};$$

$$k_s = \tan(31^\circ) = 0.6 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}.$$

Отношение нормальной к тангенциальной жесткости (k_n/k_s) составляет 15,83.

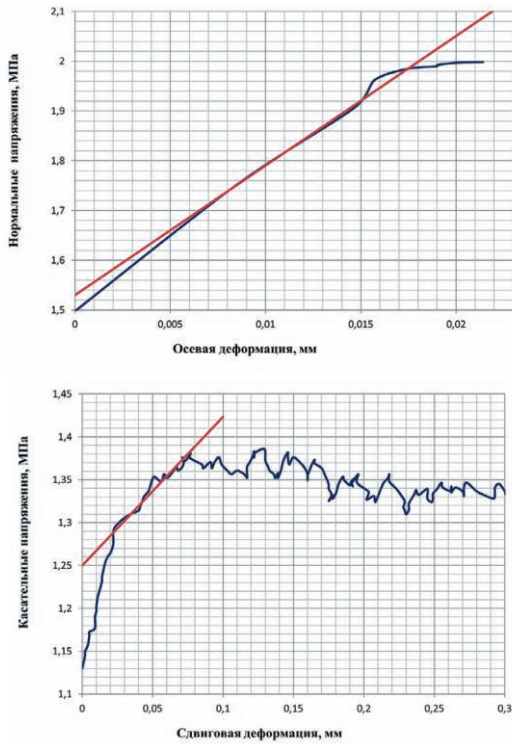


Рис. 6
Этап №3, нормальная нагрузка
2,0 МПа

Fig. 6
Stage No. 3, normal load of
2.0 MPa

На третьем этапе нагружения (см. рис. 6) получены следующие значения жесткостей:

$$k_n = \tan(87.8^\circ) = 26.03 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}};$$

$$k_s = \tan(60^\circ) = 1.73 \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}.$$

Отношение нормальной к тангенциальной жесткости составляет 15,03.

Полученные в итоге результаты испытаний шести образцов уррита среднезернистого массивного представлены в табл. 1.

В ходе испытаний образца уррита №5 наблюдалось его разрушение в окрестности трещины, о чем свидетельствуют завышенные значения коэффициента жесткости, вид графиков деформирования при сдвиге, а также состояние самого образца после испытаний. По этой причине результаты данного испытания в дальнейшем анализе не учитывались.

На первом этапе испытаний образца уррита №4, исходя из графика зависимости касательных напряжений и сдвиговой деформации, произошел спад действующей субгоризонтальной нагрузки с соответствующим выполаживанием кривой. Это также может указывать на частичное истирание берегов трещины с сопутствующим снижением шероховатости поверхности скольжения и дальнейшее снижение величин тангенциальной жесткости.

Коэффициент жесткости трещины по мере увеличения нормальной нагрузки возрастает, что свидетельствует о разрушении неровностей поверхностей трещин в образце. Исходя из этого дальнейшей оценке будут подлежать первые этапы каждой серии измерений вне зависимости от величин прикладываемой нормальной нагрузки. Характер графиков нормальной жесткости на первых этапах всех экспериментов (см. рис. 4) с образцами имел скорее экспоненциальный вид, тогда как на втором и третьем этапах был близок к степенной зависимости, что также объясня-

Таблица 1
Технические характеристики маршрутных заданий

Table 1
Technical specifications of the flight route assignments

№ образца	Угол	№ эксперимента	Нормальная нагрузка, МПа	k_n , МПа/мм	k_s , МПа/мм	$\frac{k_n}{k_s}$
1	58°	1.1	0,5	2,48	0,75	3,28
		1.2	1,0	5,67	2,61	2,18
		1.3	1,5	8,14	0,7	11,63
2	86°	2.1	1,0	3,27	1,23	2,65
		2.2	1,5	11,43	7,12	1,48
		2.3	2,0	11,43	3,08	3,71
3	72°	3.1	0,5	1,11	0,15	7,26
		3.2	1,0	1,96	0,19	10,1
		3.3	1,5	1,19	0,14	8,48
4	77°	4.1	1,0	6,31	1,54	4,1
		4.2	1,5	9,51	0,6	15,83
		4.3	2,0	26,03	1,73	15,03
5	74°	5.1	1,5	14,3	1,07	13,34
		5.2	2,0	38,19	0,7	54,54
		5.3	2,5	57,29	0,27	213,81
6	79°	6.1	2,0	7,3	1,33	5,5
		6.2	3,0	31,82	5,67	5,61
		6.3	3,5	16,35	1,66	9,82

ется выполаживанием стенок трещины в результате истирания ее берегов.

Среднее значение отношения нормальной к тангенциальной жесткости по всем анализируемым образцам на первых этапах нагружения экспериментов равняется 4,55, что близко к значениям, полученным другими исследователями [9–14]. Использование взаимосвязи между коэффициентом жесткости и коэффициентом Пуассона в дальнейшем дает возможность определять упругие характеристики заполнителя трещин.

Увеличение начальной нормальной нагрузки на первых этапах измерений (№1.1, №2.1) и (№3.1, №4.1) приводит к увеличению значений нормальной и тангенциальной жесткости, что свидетельствует о влиянии на них не только геометрических и механических характеристик, но и масштабного эффекта.

Консолидация стенок искусственной трещины приводит к сильному разбросу в получаемых результатах лабораторных испытаний. Наиболее адекватную оценку, предположительно, могут дать многочисленные испытания образцов керна нарушенной породы с естественной трещиной. В целом полученная совокупность экспериментальных определений позволяет установить количественные характеристики исследуемых параметров.

Заключение

Проведенные лабораторные испытания образцов уррита на сдвиг по методике постоянной нормальной нагрузки позволили количественно оценить нормальную и тангенциальную жесткость искусственных трещин в зависимости от величины приложенной нагрузки и геометрии

образцов. Установлено, что с увеличением нормальной нагрузки происходит изменение контактных характеристик: возрастает нормальная жесткость, в то время как тангенциальная жесткость может как снижаться, так и проявлять нелинейное поведение, что связано с постепенным истиранием и разрушением неровностей берегов трещины.

Выявленный разброс результатов подчёркивает необходимость дальнейших исследований с использованием образцов с естественными трещинами, что повысит достоверность входных данных для численного моделирования НДС и, как следствие, надёжность геомеханического обоснования горных работ в сложных горно-геологических условиях Хибинского массива.

Определены усредненные значения нормальной и тангенциальной жесткости открытой трещины для образцов вмещающих пород месторождений Хибинского массива. Поскольку трещина имеет определенную протяженность, контактная жесткость может быть представлена интегральной величиной по всему слою контактных элементов аналогично модулю Юнга и коэффициенту Пуассона, характеризующим конечные элементы для отдельных типов пород модели. Полученные параметры жесткости можно применять совместно с использованием программного модуля FEM Contact Solver [15; 16] для построения геомеханических моделей трещиноватых массивов пород, прогнозирования их напряжённо-деформированного состояния, а также оценки устойчивости горных выработок.

Список литературы / References

1. Козырев А.А., Семенова И.Э., Шестов А.А., Веттегерен В.И., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Крючков М.А. Трёхмерное моделирование геомеханического состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит». В кн.: *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. материалов науч. конф., г. Новосибирск, 2–5 окт. 2007 г.* Новосибирск: СО РАН; 2008. С. 272–278.
2. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(12):347–359. Kozurev A.A., Panin V.I., Semenova I.E. Geodynamic risk management at the Khibiny apatite mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(12):347–359. (In Russ.)
3. Cundall P.A., Hart R.D. Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*. 1992;9(2):101–113. <https://doi.org/10.1108/eb023851>
4. Wriggers P. *Computational Contact Mechanics*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer; 2006. 518 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0>
5. Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1968;94(3):637–660. <https://doi.org/10.1061/JSFDAQ.0001133>
6. Латышев О.Г., Казак О.О. Влияние нарушенности горных пород на их свойства и состояние. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017;(4):62–65. Режим доступа: <https://iuggu.ru/index.php?id=785:12-4-17> (дата обращения: 12.10.2025). Latyshev O.G., Kazak O.O. The influence of the geological material disturbance on its properties and condition. *News of the Ural State Mining University*. 2017;(4):62–65. (In Russ.) Available at: <https://iuggu.ru/index.php?id=785:12-4-17> (accessed: 12.10.2025).

7. Barton N., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 1977;10(1-2):1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
8. Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Кузнецов Н.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния в окрестности горной выработки, пересеченной трещиной, в условиях тектонического сжатия. *Горный журнал*. 2024;(11):31–35. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.11.05>
Semenova I.E., Dmitriev S.V., Kuznetsov N.N. Stress–strain analysis in neighborhood of underground opening with crack intersection under tectonic compression. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(11):31–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.11.05>
9. Cao P., Deng H., Chen Y., Fu N. The shear characteristic and failure mechanism study of infilled rock joints with constant normal load. *Journal of Vibroengineering*. 2019;21(4):940–951. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20055>
10. Cao P., Deng H., Chen Y., Fu N. The shear characteristic and failure mechanism study of infilled rock joints with constant normal load. *Journal of Vibroengineering*. 2019;21(4):940–951. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.20055>
11. Shahverdilloo M.R., Zare S. Studying the normal stress influential factor on rock joint stiffness using CNL direct shear test. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14(20):2082. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08449-6>
12. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба. *Физическая мезомеханика*. 2002;5(5):23–42.
Kostyuchenko V.N., Kocharyan G.G., Pavlov D.V. Strain characteristics of interblock gaps of different scales. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2002;5(5):23–42. (In Russ.)
13. Конохов Д.С. *Изучение механических свойств крупных трещин методом математического моделирования* [автореф. дис. ... канд. техн. наук]. М.; 2000. 20 с.
14. Юфин С.А., Ламонина Е.В. Анализ напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных пород с использованием численных методов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(10):268–277. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2008/10/6_YUfin4.pdf (дата обращения: 12.10.2025).
Yufin S.A., Lamonina E.V. Analysis of the stress-and-strain state of fractured rocks using numerical methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(10):268–277. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2008/10/6_YUfin4.pdf (accessed: 12.10.2025).
15. Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Шестов А.А. *FEM Contact Solver*: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. RU 2023681528. Опубл. 16.10.2023.
16. Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей. *Проблемы недропользования*. 2017;(1):132–137. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.132>
Dmitriev S.V. Simulation the stressed-deformed rock masses state taking into account the heterogeneities. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(1):132–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.132>

Информация об авторах

Дмитриев Сергей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0422-5699>; e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

Кузнецов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательским сектором (лабораторией), ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Information about the authors

Sergey V. Dmitriev – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0422-5699>; e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

Nikolai N. Kuznetsov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Sector (Laboratory), Leading Research Associate, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>; e-mail: n.kuznecov@ksc.ru

Article info

Received: 19.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 17.02.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 17.02.2026