ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5—2):103—110
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_103

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВА ПРИ СТАДИЙНОЙ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ ЛИНЗЫ ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

М. С. Кулькова[1], А. В. Земцовский[1]

[1] Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия

Аннотация: Отработка запасов линз или жил сложной геометрической формы системой разработки с открытым очистным пространством обуславливает необходимость определения оптимальных параметров камер и целиков, а также последовательности их отработки. Полное и безопасное извлечение запасов линзы может быть обеспечено только при соблюдении условия устойчивости пород кровли камер и параметров целиков. Линза ЮЗ-2 расположена в районе Юго-Западного рудного тела (ЮЗРТ) Ждановского месторождения и характеризуется сложной геометрической формой. Размеры линзы позволяют использовать камерную систему разработки с открытым очистным пространством. Таким образом, определение устойчивых параметров целика и обеспечение устойчивости очистного пространства при отработке данного участка Ждановского месторождения являются актуальными задачами. Для решения этих задач применялось двухмерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива с использованием метода конечных элементов в упругой постановке. Были созданы 2 модели массива, соответствующие вертикальным сечениям по простиранию и вкрест простирания рудного тела. В результате расчета НДС массива были получены распределения максимальных и минимальных напряжений и определены устойчивые параметры целика и очистного пространства.

Ключевые слова: Ждановское месторождение, напряженно-деформированное состояние массива, численное моделирование напряженного состояния, метод конечных элементов, отработка запасов линзы, параметры камер и целиков, устойчивое состояние массива, безопасность ведения горных работ.

Для цитирования: *Кулькова М. С., Земцовский А. В.* Оценка устойчивости массива при стадийной отработке запасов линзы Ждановского месторождения по результатам моделирования его напряженно-деформированного состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5—2. — С. 103—110. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_103.

Rock mass stability estimation in phased mining of Zhdanov lentil reserves by stress–strain modeling data

M. S. Kulkova[1], A. V. Zemtsovskii[1]

[1] Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia

© М. С. Кулькова, А. В. Земцовский. 2021

Abstract: Extraction of mineral reserves from lentils and lodes of complex geometry by the open stoping method requires optimization of room and pillar parameters and stoping sequence. Safe and complete extraction of lentils can only be ensured given stability of roof rocks in rooms and maintenance of pillar parameters. SW 2 lentil occurs at the South-West ore body of Zhdanov deposit and features a complex geometry. Dimensions of the lentil enable using the open stoping method. Determination of stability conditions for pillar and open stope in this area of Zhdanov deposit is of the current concern. To this effect, we used the 2D elastic stress–strain modeling based on the finite element method. Two models were constructed to describe the vertical cross-sections along and across the strike of the ore body. The stress–strain modeling produced distribution of maximal and minimal stresses and the stable parameters of pillar and open stope.

Key words: Zhdanov deposit, rock mass stress–strain behavior, stress state modeling, finite elements method, lentil mining, parameters of stopes and pillars, rock mass stability, mining safety.

For citation: Kulkova M. S., Zemtsovskii A. V. Rock mass stability estimation in phased mining of Zhdanov lentil reserves by stress–strain modeling data. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5—2):103—110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_103.

Введение

Ждановское месторождение медно-никелевых руд расположено на северо-западе Мурманской области, за Полярным кругом. Оно является самым крупным среди месторождений Печенгского рудного поля [1]. Ждановское месторождение было разведано в начале XX в. [2], и в настоящее время разрабатывается подземным рудником «Северный» АО «Кольская ГМК». Месторождение представлено шестью рудными телами: Западным (ЗРТ), Юго-западным (ЮЗРТ), Центральным (ЦРТ), Восточным (ВРТ), Юго-восточным (ЮВРТ) и Южным (ЮРТ) [3]. В статье описывается изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива по мере отработки запасов линзы ЮЗ-2. Размеры линзы позволяют использовать камерную систему разработки с открытым очистным пространством [4].

Линза ЮЗ-2 генетически является частью Юго-западного рудного тела и характеризуется сложной геометрической формой [5] с раздувами и пережимами как по простиранию, так и по мощности, а также имеет несколько апофизов (рис. 1). Линза имеет максимальные поперечные размеры в плане 40 м и 75 м и высоту около 55 м. Такие размеры позволяют использовать камерную систему разработки с открытым очистным пространством. Из-за сложной конфигурации линзы принято решение об отработке ее запасов поэтапно, с оставлением целика и последующем его погашением.

Для определения устойчивых параметров целика и очистного пространства применялся метод численного моделирования НДС массива с использованием метода конечных элементов в упругой постановке, в плоском варианте.

Исходные данные

Для создания численных моделей НДС массива необходимо знать геологическое строение, прочностные и деформационные характеристики основных типов пород, исходный тип поля напряжений, значения и направления действия главных компонент напряжений [6].

Рудное тело на данном участке представлено серпентинизированными

мелкозернистыми перидотитами зеленовато-серого цвета с вкрапленностью сульфидов. Вмещающий массив представлен тонко-мелкозернистыми метаосадочными породами темно-серого цвета, трещины в которых залечены кварц-карбонатным материалом. И рудное тело, и породы вмещающего массива характеризуются средней трещиноватостью и средней устойчивостью. Коэффициент крепости пород вмещающего массива и рудного тела по шкале проф. Протодьяконова f = 14.

Специалистами Горного института КНЦ РАН (г. Апатиты) проведен комплекс лабораторных испытаний руд и пород Ждановского месторождения на прочностные и деформационные свойства. Результаты испытаний образцов породных разностей, приуроченных к ЮЗРТ, представлены в табл. 1.

Таким образом, массив линзы ЮЗ-2 представлен прочными и высокоупругими породами.

Наиболее сложной задачей при создании модели являлось определение параметров исходного поля напряжений [7], действующего на Ждановском месторождении в целом и в окрестности ЮЗРТ в частности. В выполненных до 2016 г. исследованиях было определено, что максимальной компонентой напряжений является вертикальная, и, соответственно, тип поля напряжений является исключительно гравитационным [5, 8].

С 2016 г. Горным институтом КНЦ РАН проводятся исследования состояния массива пород Ждановского месторождения. В результате измерений действующих напряжений в нетронутом массиве методом разгрузки было

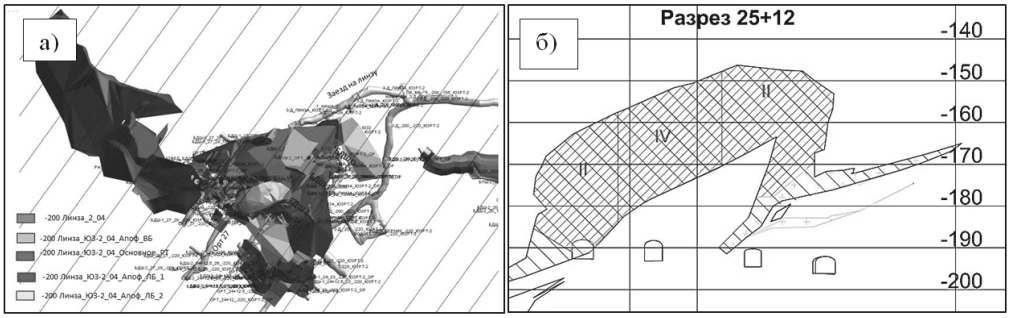

Рис. 1. Конфигурация линзы ЮЗ-2: а — в объемном виде; б — в виде разреза вкрест простирания рудного тела.
Fig. 1. Shape of the lens YZ-2: a — in three-dimensional view; b — in vertical section across the strike

Таблица 1
Прочностные и деформационные характеристики основных типов пород ЮЗРТ.
The strength and deformation characteristics of general types of rocks.

Тип пород/руд	Прочность на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$), МПа	Прочность на растяжение ($\sigma_р$), МПа	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, т/м^3
Серпентинизированный перидотит	164	16.4	85.2	0.25	2.85
Метаосадочные породы	87	13.8	84.6	0.25	2.78

установлено, что наряду с вертикальной компонентой в массиве действуют значительные тектонические силы, то есть тип поля напряжений является гравитационно-тектоническим [9], при этом значения субгоризонтальной

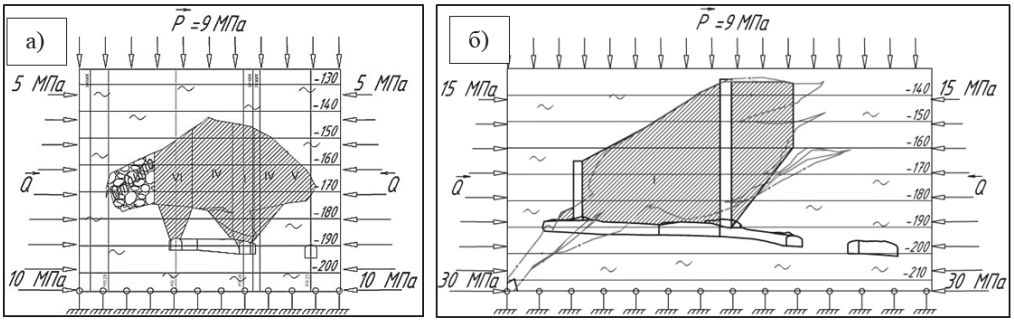

Рис. 2. Схема модели: а — сечение по простиранию рудного тела; б — сечение вкрест простирания рудного тела
Fig. 2. The scheme models in vertical section: a — on the strike; b — across the strike

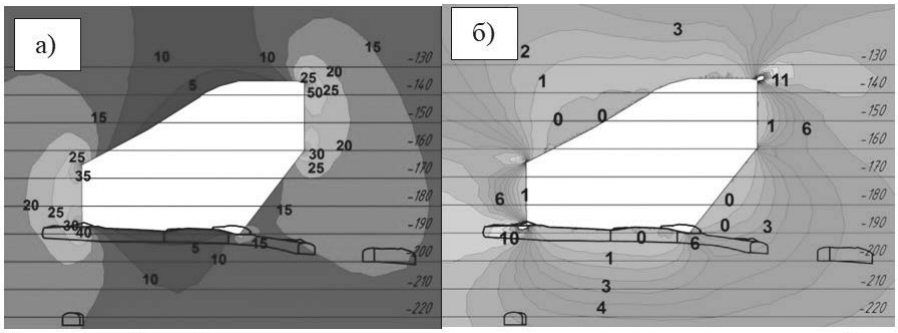

Рис. 3. Распределение главных компонент напряжений на этапе оставления целика: а — σ_{max}; б — σ_{min} (сечение вкрест простирания рудного тела)
Fig. 3. The distribution of maximum σ_{max} (a) and minimum σ_{min} (b) stresses around the stope. The cross-section across the strike. The stage of excavation with pillar remained

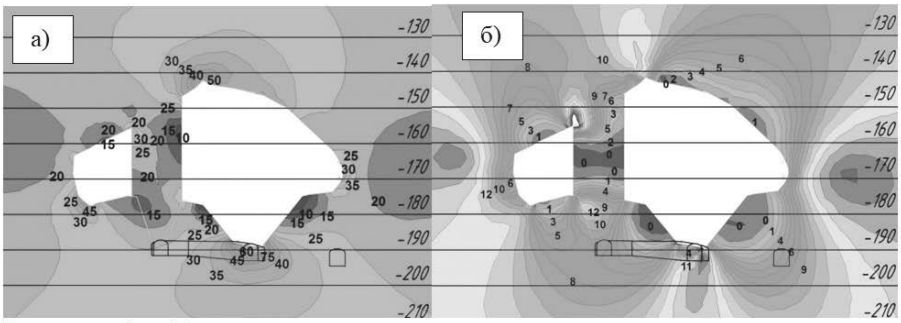

Рис. 4. Распределение главных компонент напряжений на этапе оставления целика: а — σ_{max}; б — σ_{min} (сечение вдоль простирания рудного тела)
Fig. 4. The distribution of maximum σ_{max} (a) and minimum σ_{min} (b) stresses around the stope. The cross-section on the strike. The stage of excavation with pillar remained

тектонической компоненты превышают вертикальную составляющую [10]. Данная гипотеза была подтверждена результатами визуального обследования подземных горных выработок. В частности, были выполнены измерения напряжений в районе ЮЗРТ. Измерения показали, что значения максимальных напряжений составили σ_{max} = 29 МПа, азимут вектора σ_{max} равен 89°, угол наклона с горизонтом — 4°.

Методы исследования

Численное моделирование НДС массивов горных пород широко применяется для оценки устойчивости массивов [11, 12], особенно при использовании системы разработки с открытым очистным пространством. В рассматриваемом случае были созданы 2 двухмерные модели массива, соответствующие вертикальным сечениям по простиранию и вкрест простирания рудного тела. В данных сечениях очистное пространство имело наибольшие размеры. Задача решалась методом конечных элементов в упругой постановке. Значения главных напряжений были получены по результатам измерений методом разгрузки и были заданы на границы модели. Значение гравитационной компоненты на глубине ведения горных работ составило 9 МПа. Поскольку исследованиями было определено, что поле напряжений является гравитационно-тектоническим, в модели учитывалось действие субгоризонтальных компонент, которые изменялись с ростом глубины от 5 до 10 МПа в плоскости по простиранию рудного тела и от 15 до 30 МПа в плоскости вкрест простирания рудного тела (рис. 2).

Результаты исследования

В связи с тем, что линза ЮЗ-2 имеет сложную конфигурацию, отработка запасов линзы выполнялась с применением системы разработки с открытым очистным пространством, при этом запасы отрабатывались поэтапно, с оставлением целика и его погашением на последней стадии. Для обоснования устойчивых параметров камеры и целика были промоделированы два состояния массива: до погашения целика (рис. 3, 4) и после погашения (рис. 5), и определены значения максимальной (σ_{max}) и минимальной (σ_{min}) компонент напряжений. Результаты представлены в виде изолиний распределения напряжений. Положительные значения относятся к сжимающим напряжениям, отрицательные — к растягивающим.

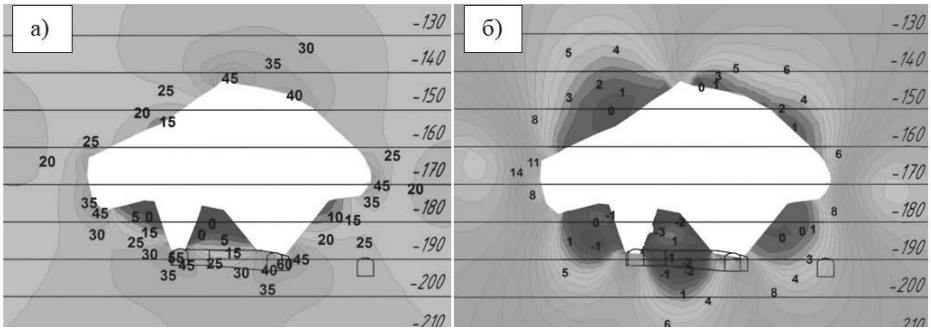

Рис. 5. Распределение главных компонент напряжений на этапе погашения целика:
а — σ_{max}; б — σ_{min} (сечение вдоль простирания рудного тела)
Fig. 5. The distribution of maximum σ_{max} (a) and minimum σ_{min} (b) stresses around the stope. The cross-section on the strike. The stage the pillar was excavated

Анализ максимальных напряжений показал, что значения в зонах концентраций не превышают 50 — 55 МПа, что говорит об устойчивом состоянии массива и низкой вероятности проявлений горного давления в динамической форме. Напряжения в целике не превышают 25 МПа, что свидетельствует об устойчивом состоянии целика.

Анализ минимальных напряжений показал, что возможные зоны разрушения из-за растягивающих напряжений располагаются в кровле. В связи с тем, что величины напряжений в данных областях близки к нулю, разрушение кровли вследствие растяжений маловероятно, но возможны отдельные вывалы пород по поверхностям естественных неоднородностей массива.

Выводы

Для определения устойчивости очистного пространства и целика при отработке линзы ЮЗ-2 Ждановского медно-никелевого месторождения было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива с использованием метода конечных элементов в упругой постановке в плоском варианте.

В результате анализа НДС массива было установлено, что при отработке запасов линзы и заданных параметрах очистного пространства и целика состояние пород можно характеризовать как устойчивое. Возможны отдельные вывалы пород в кровле по поверхностям естественных неоднородностей массива.

Необходимо отметить, что при анализе состояния массива подразумевалось наличие тектонических напряжений, о которых говорят результаты измерений напряжений и данные визуального осмотра выработок на Ждановском месторождении. В данном случае наличие тектонических напряжений положительно повлияло на устойчивость пород и при их отсутствии в массиве, то есть при действии исключительно собственного веса пород в кровле будут формироваться зоны со значительными растягивающими напряжениями, что может привести к обрушению пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нестеров К. В.*, *Кузенков М. В.* Развитие ресурсной базы АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. — 2019. — № 11 (923). — С. 16 — 22. DOI 10.17580/tsm.2019.11.01.
2. *Горбунов Г. И.*, *Астафьев Ю. А.*, *Гончаров Ю. В.* и др. Медно-никелевые месторождения Печенги. — М.: ГЕОС. — 1999. — 236 с.
3. *Волков В. Н.*, *Макеев В. И.* История и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса ОАО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. — 2013. — № 10. — С. 27 — 32.
4. *Токарев О. В.*, *Кузенков М. В.*, *Удалов А. Е.* Технологии подземной выемки запасов медно-никелевых руд Ждановского месторождения в период перехода с открытого способа разработки на подземный // Горный журнал. — 2015. — № 6. — С. 60 — 64. DOI 10.17580/gzh.2015.06.12.
5. *Еременко В. А.*, *Еременко А. А.*, *Потапов Е. В.*, *Павлов Д. А.*, *Атанов В. В.*, *Временков С. В.* Геомеханическая оценка состояния массива при ведении горных работ на Ждановском месторождении подземным способом // ГИАБ. — 2010. — № 11. — С. 271 — 282.
6. Mallı, T. Yetkin, M. Özfırat, M. Kahraman, B. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. Journal of African Earth Sciences, 2017, No. 134, pp. 365 — 372. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.07.018.

7. Heidarzadeh, Sh. Saeidi, A., Rouleau, A. Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling. International Journal of Mining Science and Technology, 2019. No.29, pp. 399–408. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.011.

8. *Ловчиков А. В.*, *Удалов А. Е.*, *Белявский Ю. Г.* Напряженное состояние пород в верхних слоях земной коры по данным натурных измерений в рудниках вблизи скважины СГ–3 // Вестник МГТУ. – 2007. – Т.10, № 2. – С. – 267–272.

9. *Мельников Д. Н.* Измерение напряжений в массиве пород Ждановского месторождения методом разгрузки (торцевой вариант) // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – № 1 (11). – С. 57–61.

10. *Козырев А. А.*, *Семенова И. Э.*, *Земцовский А. В.* Об оценке удароопасности массива горных пород Ждановского месторождения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – № 14. – С. – 300–303.

11. Heidarzadeh, Sh. Assessing the effect of open stope geometry on rock mass brittle damage using a response surface methodology. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, No.106, pp. 60–73. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.015.

12. *Wael R.* Abdellah, *Haitham M.* Ahmed & *Mohammed A.* Hefni. Numerical modelling of staged stope extraction in a tabular steeply dipping deposit. Geomechanics and Geoengineering, 2019, No. 14, pp. 41–51. DOI: 10.1080/17486025.2018.1508856. ГИАБ

REFERENCES

1. Nesterov K. V., Kuzenkov M. V. Expanding Kola MMC'S resource base. *Cvetnye metally*. 2019. no. 11 (923). pp. 16–22. DOI 10.17580/tsm.2019.11.01. [In Russ]

2. Gorbunov G. I., Astaf'ev Yu. A., Goncharov Yu. V. i dr. *Medno-nikelevye mestorozhdeniya Pechengi* [Copper-nickel deposits of Pechenga]. Moscow: GEOS. 1999. 236 p. [In Russ]

3. Volkov V. N., Makeev V. I. History and prospects of development of mineral resource complex of Kola Mining and Metallurgical Company. *Cvetnye metally*. 2013. no. 10. pp. 27–32. [In Russ]

4. Tokarev O. V., Kuzenkov M. V., Udalov A. E. Underground mining technology for the transition from open-pit to underground operation at the Zhdanov copper–nickel ore deposit. *Gornyj zhurnal*. 2015. no. 6. pp. 60–64. DOI 10.17580/gzh.2015.06.12. [In Russ]

5. Eremenko V. A., Eremenko A. A., Potapov E. V., Pavlov D. A., Atanov V. V., Vremenkov S. V. The estimation of the rock mass state of the Zhdanovskoe deposit during underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010. no. 11. pp. 271–282. [In Russ]

6. Mallı, T. Yetkin, M. Özfırat, M. Kahraman, B. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, No. 134, pp. 365–372. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.07.018.

7. Heidarzadeh, Sh. Saeidi, A., Rouleau, A. Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019. No.29, pp. 399–408. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.05.011.

8. Lovchikov A. V., Udalov A. E., Belyavskij Yu. G. The rock mass stress state at the high layers of the Earth's crust according to in-situ measurements at the underground mines near the ultra-deep bore hole SG-3. *Vestnik MGTU*. 2007. T.10, no. 2. pp. 267–272. [In Russ]

9. Mel'nikov D. N. Stress Measurements in rock mass of the Zhdanovskoe deposit by the doorstoppermethod. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. 2019. no. 1 (11). pp. 57–61. [In Russ]

10. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zemcovskij A. V. *Ob ocenke udaroopasnosti massiva gornyh porod Zhdanovskogo mestorozhdeniya* [The rock burst estimation of the Zhdanovskoe deposit rock mass]. Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN. 2017. no. 14. pp. 300 – 303. [In Russ]

11. Heidarzadeh, Sh. Assessing the effect of open stope geometry on rock mass brittle damage using a response surface methodology. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, no.106, pp. 60 – 73. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.015.

12. Wael R. Abdellah, Haitham M. Ahmed & Mohammed A. Hefni. Numerical modelling of staged stope extraction in a tabular steeply dipping deposit. *Geomechanics and Geoengineering*, 2019, no. 14, pp. 41 – 51. DOI: 10.1080/17486025.2018.1508856.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулькова Мария Сергеевна[1] – аспирант, м.н.с., m.kulkova@ksc.ru;
Земцовский Александр Васильевич[1] – канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Инструментальных исследований состояния горных пород Арктической зоны РФ»;
[1] Горный институт Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kulkova M. S.[1], PhD student, Junior researcher, m.kulkova@ksc.ru;
Zemtsovskii A. V.[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of the laboratory;
[1] Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 29.03.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 27.01.2021; received after the review 29.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.