



Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром

М.М. Каган✉, Д.С. Чернобров

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

Резюме: В статье приводятся некоторые результаты мониторинга сейсмичности массива пород рудника, обрабатываемого открытым способом. В ходе исследований произведена оценка сейсмического воздействия на участках ведения открытых горных работ. В результате зарегистрированы мощные сейсмические события, приуроченные к прибортовому массиву карьера, с очагами на глубине от 10 до 50 м от свободной поверхности. Выявлены потенциально опасные с точки зрения потери устойчивости борта зоны концентрации сейсмических событий. Установлено положение этих зон относительно структурных нарушений внутри массива пород. Проанализировано изменение их положения с течением времени. Данные, полученные в результате исследований, позволили установить зависимости, связывающие динамику микросейсмической активности и деформационных процессов в прибортовом массиве пород. Материал представляет интерес для специалистов, занимающихся геофизическим контролем состояния геологических сред при техногенных воздействиях и геомеханикой открытых горных работ.

Ключевые слова: открытые горные работы, борт карьера, массив пород, сейсмический метод, сейсмические события, сейсмическая активность, структурные нарушения, трещинообразование

Для цитирования: Каган М.М., Чернобров Д.С. Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром. *Горная промышленность*. 2023;(S1):84–88. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>

Monitoring of seismic activity in near-wall rock masses of open pits using seismic recorders in deep boreholes beyond the final pit boundary

M.M. Kagan✉, D.S. Chernobrov

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

Abstract: The article presents some results of monitoring seismicity in a rock mass at an open-pit ore mine. The research included an assessment of the seismic impact in the open-pit mining areas. As the result, strong seismic events, confined to the near-wall rock mass of the open-pit mine were registered with their hot-spots lying within the depth of 10 to 50 meters from the free surface. Potentially hazardous zones were identified in terms of wall stability loss as well as the zone of seismic events concentration. Locations of these zones in relation to the structural faults inside the rock mass were determined. Changes in their position over time were analyzed. The data obtained as a result of the study helped to establish the correlations between the dynamics of microseismic activity and the deformation processes in the near-wall rock mass. This information is of interest for specialists involved in geophysical control of geological media under man-made impacts as well as in geomechanics of surface mining.

Keywords: surface mining, open pit wall, rock mass, seismic method, seismic events, seismic activity, structural faults, fracturing

For citation: Kagan M.M., Chernobrov D.S. Monitoring of seismic activity in near-wall rock masses of open pits using seismic recorders in deep boreholes beyond the final pit boundary. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):84–88. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>



Введение

На карьерах традиционно применяется комплекс методов мониторинга устойчивости бортов [1]. Для оценки состояния прибортового массива применяются геодезические, геофизические и аналитические методы [2; 3], одним из которых является микросейсмический мониторинг [4–6]. Большинство применяемых методов являются поверхностными. Сейсмический мониторинг является по сути единственным, который может дать информацию о процессах, развивающихся непосредственно внутри массива пород.

В исследовании использовались данные, полученные в результате работы системы сейсмического мониторинга бортов карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа, за трехлетний период – с 2020 по 2022 г. Объектом исследований являлся прибортовый массив рудника, обрабатываемого открытым способом.

Технические особенности системы сейсмического мониторинга

Карьер рудника «Железный» оснащен системой микросейсмического мониторинга. В текущей конфигурации система существует с 2020 г. В настоящее время состоит из 12 сейсмических датчиков, размещенных в 4 скважинах глубиной порядка 1000 м, вынесенных за пределы конечного контура карьера [7].

Система сейсмического мониторинга включает в себя (рис. 1) следующие функциональные блоки:

- сейсмическую сеть из сейсмических датчиков в скважинах в бортах карьера [8];
- пункты удаленной сейсмической регистрации для регистрации сейсмических сигналов и передачи информации в центральный пункт сбора информации, расположенные на поверхности в непосредственной близости от устьев скважин с сейсмическими датчиками;
- центральный пункт сбора информации, обеспечивающий функционирование системы в реальном времени, сбор и анализ сейсмической информации по всей сети.



Рис. 1 Система сейсмического мониторинга бортов карьера рудника «Железный»

Fig. 1 Seismic monitoring system of the Zhelezny open pit walls

Параметры сейсмической эмиссии имеют существенную зависимость от физико-механических и реологических свойств пород, слагающих прибортовой массив карьеров, что существенно усложняет интерпретацию микросейсмических данных. Поэтому сложно говорить об универсальной методике интерпретации результатов сейсмического мониторинга в терминах оценки устойчивости бортов карьеров [9; 10].

В настоящее время система используется главным образом для регистрации очагов сейсмических событий. Блок регистрации записывает в память отрывки сигнала с каждого датчика при превышении пороговой амплитуды колебаний [11]. В результате формируется каталог, включающий в себя точное время, координаты и энергетические параметры каждого зарегистрированного события. По данным таких каталогов анализируются изменения основных параметров сейсмической активности с целью выявления пространственных зон концентрации сейсмических событий и их расположения относительно участков ведения горных работ [12]. Контроль за геомеханическим состоянием борта карьера осуществляется на основе наблюдений за процессом образования и миграции зон сейсмической активности.

Результаты сейсмического мониторинга

Далее приведены основные результаты работы системы сейсмического мониторинга за трехлетний период.

Общее количество сейсмических событий, зарегистрированных за период с 2020 по 2022 г., с разбивкой по источникам представлено в табл. 1. Системой зарегистрировано более 700 сейсмических событий, обусловленных процессами трещинообразования в прибортовом массиве пород. Также более 1000 событий было отнесено к событиям технологического характера: массовых взрывов, технологических шумов от работы технологического оборудования и горной техники.

Таблица 1 Распределение сейсмических событий, зарегистрированных системой сейсмического мониторинга (период 2020–2022 гг.)

Table 1 Distribution of seismic events recorded by the seismic monitoring system (in 2020–2022)

Источник события	Количество событий
Естественная сейсмичность	1510
Сейсмичность технологического характера	566
Массовые взрывы	420
Всего	2495

За период с 2020 по 2022 г. было зарегистрировано 45 сейсмических события с энергией, превышающей 105 Дж. Наиболее мощное событие произошло 06.01.2022 в 9:02. Его энергия составила $9 \cdot 10^5$ Дж. Местоположение: юго-западная часть борта карьера. Наиболее мощные события, зарегистрированные в прибортовом массиве карьера рудника «Железный», приведены в табл. 2. Положения эпицентров сильных событий относительно бортов карьера приведены на рис. 2.

К мощным сейсмическим событиям могут быть отнесены такие, линейные размеры очага которых сопоставимы



с характерными размерами элементов, представляющих борт карьера (высота уступов, ширина берм т.п.). Выявление мощных сейсмических событий является задачей реального времени, и система микросейсмического мониторинга позволяет делать это максимально оперативно.

Таблица 2
Мощные сейсмические события, зарегистрированные на карьере рудника «Железный» (период 2020–2022 гг.)

Дата	Энергия, Дж	Размер очага, м
17.05.2020 17:05	4.46E+06	45
15.12.2021 1:58	1.92E+06	42
25.12.2021 14:26	4.11E+06	44
06.01.2022 9:02	9.07E+05	35
17.05.2022 20:18	1.39E+06	42

Table 2
Strong seismic events recorded at the Zhelezny open pit mine (in 2020–2022)

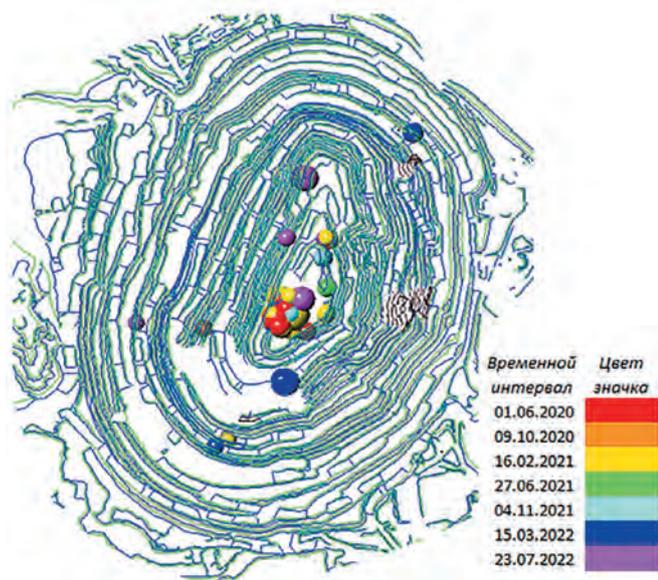


Рис. 2
События с энергией больше 10^5 Дж. Период 2020–2022 гг.: цветные шары – сейсмические события; цвет значка – временной интервал регистрации сейсмического события

Fig. 2
Events with the energies exceeding 10^5 J. Period of 2020–2022: colored balls are the seismic events; the colour of the icon is the time interval of seismic event registration

Пространственное районирование сейсмичности осуществляется за счет визуального просмотра распределения сейсмических событий в трехмерном пространстве и применения методов кластерного анализа для выявления зон концентрации сейсмических событий [13]. Ранжирование выделенных зон по степени влияния на устойчивость бортов карьера выполняется на основе их пространственного расположения относительно бортов карьера и имеющихся геологических структур [14].

На рис. 3 представлено в плане пространственное распределение очагов сейсмических событий. Очаги находились на глубине от 10 до 50 м от свободной поверхности.

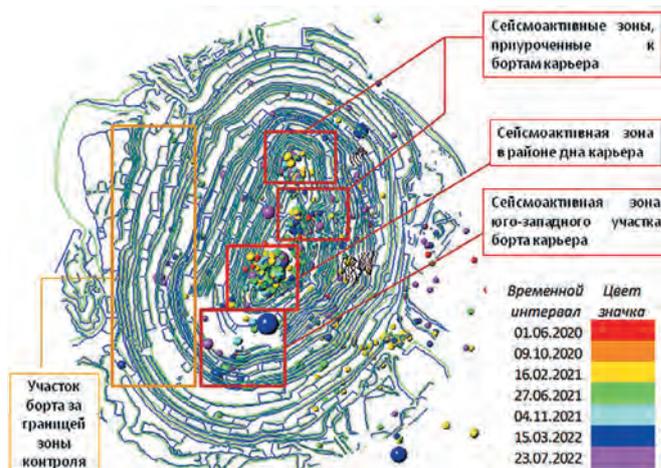


Рис. 3
Сейсмичность прибортового массива карьера рудника «Железный»: цветные шары – сейсмические события; цвет значка – временной интервал регистрации сейсмического события; размер значков пропорционален энергетическому классу события

Fig. 3
Seismic activity in the near-wall rock mass of the Zhelezny open pit mine: colored balls are the seismic events; the colour of the icon is the time interval of seismic event registration; the size of the icons is proportional to the energy class of the event

В пространственном распределении сейсмических событий можно выделить 4 сейсмоактивные зоны.

С точки зрения оценки влияния выявленных сейсмоактивных зон на устойчивость бортов карьера можно отметить, что зоны, приуроченные ко дну карьера, на устойчивость бортов не оказывают влияния. Сейсмичность этой зоны определяется перестройкой НДС (напряженно-деформированного состояния) породного массива в результате углубления карьера. Зоны концентрации сейсмических событий, приуроченные непосредственно к бортам, являются потенциально опасными, что необходимо учитывать при дальнейшем планировании горных работ в карьере. Наиболее опасной зоной, которую система выявила за вышеозначенный период, является зона в районе средних горизонтов юго-западного участка борта карьера. В этой зоне ранее происходили акты обрушения. И наличие сейсмичности может свидетельствовать о продолжении процессов трещинообразования, которые могут в дальнейшем привести к повторным случаям потери целостности борта карьера.

Также проведен анализ изменений сейсмичности прибортового массива с течением времени (рис. 4).

В 2020 г. выявлены 3 сейсмоактивные зоны. Две из них приурочены к бортам карьера и одна зона расположена под дном карьера. Зоны концентрации сейсмических событий, приуроченные к средним горизонтам бортов, являются потенциально опасными с точки зрения выхода структурных нарушений на открытую поверхность борта. Наиболее опасной зоной в этот период наблюдений является зона северо-восточного участка борта. События в этих зонах находятся рядом с зоной влияния геологических разломов и могут быть связаны с активизацией геологических структур в процессе формирования контура карьера. Наличие таких зон необходимо учитывать при дальнейшем планировании горных работ в карьере.

В 2021 г. выявлена новая зона концентрации сейсмиче-

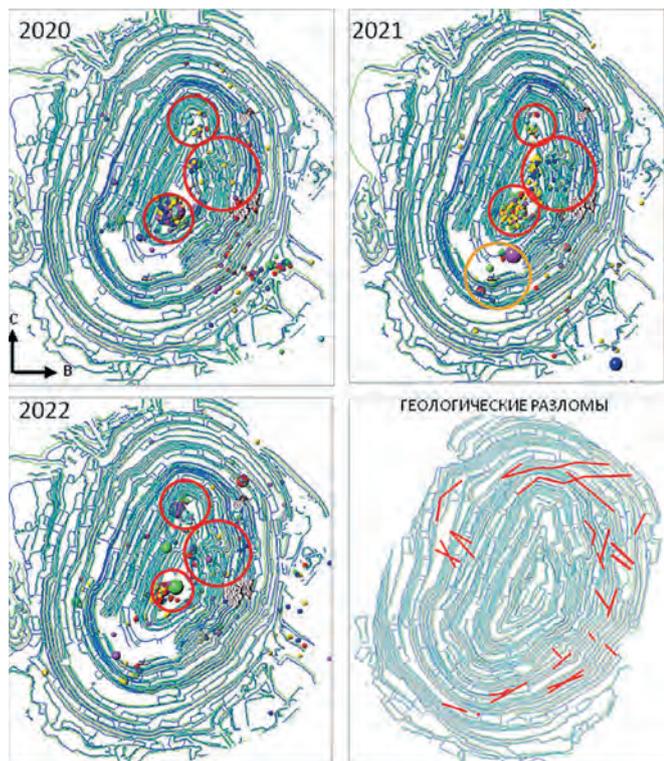


Рис. 4
Изменения сейсмоактивности прибортового массива карьера: А, Б, В – сейсмоактивные зоны; Г – расположение геологических нарушений: цветные шары – сейсмические события; цветные круги – зоны сейсмоактивности; красные линии – системы трещин

Fig. 4
Changes in the seismic activity of the near-wall rock mass in the open pit mine: А, Б, В – seismically active zones; Г – location of geological disturbances: colored balls are the seismic events; coloured circles are seismically active zones; red lines are the fracture system

ских событий в нижней части юго-западного участка борта, которая не фиксировалась ранее. В этой зоне зафиксирован ряд мощных сейсмических событий с энергией больше 105 Дж, находящихся рядом с зонами геологических разломов, выявленных ранее геологическими методами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests

Список литературы

1. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Зуев Б.Ю., Павлович А.А. Влияние землетрясений на устойчивость бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(4):3–19.
2. Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В., Замятин А.Л., Зуев П.И. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Горная промышленность*. 2022;(1S):105–110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110>
3. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Розанов И.Ю. Многоуровневый подход к организации мониторинга устойчивости бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(5):106–113. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210510>
4. Li J., Wu Shun-Chuan, Gao Y., Xie Y., Ji M. Review of slope micro-seismic monitoring in open-pit mine. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2014;33:3398–4013. (In Chinese) <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.077>
5. Kondela J., Prekopova M., Budinsky V., Pandula B., Ďuriška I. The importance of seismic methods application for geological reconstruction of rockslide threatened open pit. *Journal of Applied Geophysics*. 2018;159:304–311. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.09.005>
6. Azhari A., Ozbay U. Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;100:218–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.005>
7. Козырев А.А., Каган М.М., Чернобров Д.С., Панасенко И.Г. Система микросейсмического мониторинга прибортового массива на

В 2022 г. выявлены три сейсмоактивные зоны. Сейсмические события, выявленные в этот период, фиксировались на значительной глубине. Непосредственного влияния на поверхность борта они не оказывали. Состояние прибортового массива карьера в этот период можно оценить как относительно устойчивое. Стоит отметить, что сейсмоактивность в ранее выявленной зоне юго-западного участка борта снизилась. Но период сейсмического спокойствия в районе геологических разломов может свидетельствовать о стадии накопления напряжений.

Стоит отметить, что на западном участке борта карьера событий регистрируется мало. Это объясняется метрологическими характеристиками системы и ограниченной зоной контроля в текущей конфигурации сети. Этот недостаток может решить расширение сейсмической сети путем дооснащения сейсмическими датчиками прибортового массива в этом районе с соответствующей дополнительной аппаратурой.

По результатам сейсмического мониторинга геологической службе Ковдорского ГОКа направлены рекомендации по проведению доизучения выявленных опасных участков другими методами контроля (маркшейдерскими, геомеханическими и геотехническими) и принятию мер по их обезопасиванию.

Заключение

Система сейсмического мониторинга бортов карьера обеспечивает устойчивую длительную регистрацию сейсмичности прибортового массива карьера.

Зарегистрированы мощные сейсмические события на небольших глубинах от поверхности борта карьера. Выявлены потенциально опасные с точки зрения потери устойчивости борта зоны концентрации сейсмических событий. Установлено положение этих зон относительно структурных нарушений внутри массива пород. Проанализировано изменение их положения с течением времени.

Полученные результаты обработки материалов сейсмологических наблюдений могут быть полезными в плане комплексирования с данными других геотехнических методов мониторинга борта карьера.



- основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):155–165. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_155
8. Mounfort P., Mendecki A. *Mine seismology reference book: Seismic sensor*. Institute of Mine Seismology; 2016. 64 p.
9. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(2):34–47.
10. Чирков Е.Б. Проблемы краткосрочного прогноза землетрясений: содержательный аспект. *Наука и технологические разработки*. 2021;100(1):5–23. <https://doi.org/10.21455/std2020.3-4>
11. Kumar S., Vig R., Kapur P. Development of earthquake event detection technique based on STA/LTA algorithm for seismic alert system. *Journal of the Geological Society of India*. 2018;92(6):679–686. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-1087-3>
12. Luo X., Salvoni M., Dight P., Duan J. Microseismic events for slope stability analysis – a case study at an open pit mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(3):205–210. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a2>
13. Woodward K., Wesseloo J., Potvin Y. A spatially focused clustering methodology for mining seismicity. *Engineering Geology*. 2018;232:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.015>
14. Лютоев В.А. Оценка степени активности разломных зон на основе поведения микросейсм. *Успехи современного естествознания*. 2018;(12-1):168–174. <https://doi.org/10.17513/use.36992>

References

1. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Zuev B.Y., Pavlovich A.A. Earthquake impact on pitwall stability. *Journal of Mining Science*. 2012;48(4):595–608. <https://doi.org/10.1134/S1062739148040016>
2. Dalatkazin T.S., Vedernikov A.S., Grigoriev D.V., Zamyatin A.L., Zuev P.I. Experience in application of geophysical methods in complex geodynamic diagnostics of rock massif. *Russian Mining Industry*. 2022; (1 Suppl.):105–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-105-110>
3. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Y. A multilevel approach to pitwall stability monitoring. *Journal of Mining Science*. 2021;57(5):805–811. <https://doi.org/10.1134/S1062739121050100>
4. Li J., Wu Shun-Chuan, Gao Y., Xie Y., Ji M. Review of slope micro-seismic monitoring in open-pit mine. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2014;33:3398–4013. (In Chinese) <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.077>
5. Kondela J., Prekopova M., Budinsky V., Pandula B., Ďuriška I. The importance of seismic methods application for geological reconstruction of rockslide threatened open pit. *Journal of Applied Geophysics*. 2018;159:304–311. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.09.005>
6. Azhari A., Ozbay U. Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;100:218–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.10.005>
7. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Chernobrov D.S., Panasenko I.G. Microseismic monitoring system of the pit's board array based on seismic sensors in deep boreholes beyond the final pit contour. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):155–165. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_155
8. Mounfort P., Mendecki A. *Mine seismology reference book: Seismic sensor*. Institute of Mine Seismology; 2016. 64 p.
9. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Mulev S.N. Laws of spreading and operational evaluation procedure for induced seismicity in mines and in mining areas. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):233–244. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020369>
10. Chirkov E.B. *Problems of short-term earthquake prediction: a formal aspect*. *Science and Technological Developments*. 2021;100(1):5–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/std2020.3-4>
11. Kumar S., Vig R., Kapur P. Development of earthquake event detection technique based on STA/LTA algorithm for seismic alert system. *Journal of the Geological Society of India*. 2018;92(6):679–686. <https://doi.org/10.1007/s12594-018-1087-3>
12. Luo X., Salvoni M., Dight P., Duan J. Microseismic events for slope stability analysis – a case study at an open pit mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(3):205–210. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a2>
13. Woodward K., Wesseloo J., Potvin Y. A spatially focused clustering methodology for mining seismicity. *Engineering Geology*. 2018;232:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.11.015>
14. Lyutoev V.A. Degree evaluation of frequency zones activity on the basis of microseism conduct. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018;(12-1):168–174. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.36992>

Информация об авторах

Кagan Михаил Моисеевич – старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7748-3288>; e-mail: m.kagan@ksc.ru

Чернобров Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1602-9217>; e-mail: d.chernobrov@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.02.2023

Поступила после рецензирования: 07.03.2023

Принята к публикации: 09.03.2023

Information about the authors

Mikhail M. Kagan – Senior Researcher, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7748-3288>; e-mail: m.kagan@ksc.ru

Dmitry S. Chernobrov – Junior Researcher, Mining Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1602-9217>; e-mail: d.chernobrov@ksc.ru

Article info

Received: 17.02.2023

Revised: 07.03.2023

Accepted: 09.03.2023