

Влияние конструктивного оформления днища блока на потери от смерзания отбитой руды при донном выпуске в условиях отрицательных температур очистного пространства

Д.Н. Петров✉, В.П. Зубков

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук; г. Якутск, Российская Федерация
✉petrovdn74@mail.ru

Резюме: Одним из неблагоприятных факторов, снижающих эффективность технологии выпуска руды под обрушенными породами, является возможность смерзания отбитой руды при выпуске, связанная с отрицательными температурами массива горных пород и рудничной атмосферы.

В статье приведены результаты исследований изменения показателей потерь отбитой руды вследствие ее смерзания в очистном пространстве при выпуске в зависимости от конструктивного оформления днища блока.

Исследования проводились методом физического моделирования на специальном стенде, в криокамере, позволяющей воспроизвести температурные условия рудных месторождений зоны распространения многолетнемерзлых горных пород. Были сконструированы два варианта днища, устанавливаемого в стенд для моделирования выпуска руды. Первый вариант днища представлял собой траншею, соединенную с ортами-заездами, второй – ряд воронок с дучками. Выпуск руды для каждого варианта днища производился при температуре -5°C и изменении влажности рудной массы от 0 до 1%. В результате проведенных исследований установлено, что прирост потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве составляет для блока с донным выпуском через воронки и дучки 46%, а с траншейным выпуском – 22%.

Полученные результаты будут использованы при разработке рекомендаций по технологии выпуска руды, в частности, обоснования оптимальных конструкций днища очистного блока, обеспечивающей безопасную и эффективную отработку запасов месторождений криолитозоны.

Ключевые слова: криолитозона, системы разработки, этажное обрушение, подэтажное обрушение, выпуск руды, моделирование, конструкция днища блока, смерзание отбитой руды

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР №122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант №13.ЦКП.21.0016. Авторы статьи выражают признательность коллегам за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Петров Д.Н., Зубков В.П. Влияние конструктивного оформления днища блока на потери от смерзания отбитой руды при донном выпуске в условиях отрицательных температур очистного пространства. *Горная промышленность*. 2023;(2):57–61. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-57-61>

Influence of stope sill design on the loss from freezing of muck during ore drawing in conditions of negative temperatures in the working excavation

D.N. Petrov✉, V.P. Zubkov

Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉petrovdn74@mail.ru

Abstract: The use of mining methods with caving and ore drawing under overlying broken rocks, which provide high mining productivity at relatively low costs for rock pressure control, is very promising in the underground mining of ore deposits in the North-East of Russia, which is characterized by harsh climatic, mining, geological and geographical conditions. However, the possibility of freezing of broken ore in the working excavation can significantly reduce the efficiency of the drawing technology. The article considers the influence of the stope sill design on the loss of ore mass from freezing during drawing. The studies were carried out using the method of physical modeling, on a special stand. Two options of the stope sill design, which were installed in the workbench for simulate ore drawing, were provided. The first option of the stope sill was a trench connected to the access crosscut, the second option was made a series of bells with box holes. Experimental drawings for each design option of the stope

sill were made in a cryochamber at the temperature of -5°C . Three series of ore drawing were performed with the ore moisture content of 0%, 0.5% and 1%.

Experimental studies on a physical model determined the qualitative patterns of changes in the loss of broken ore from freezing in the working excavation during ore drawing, depending on the design of the stope sill. The results of the conducted studies showed that the increase in the loss of broken ore from freezing in the working excavation when drawing through bells with box holes is 46%, through a trench and access crosscut 22%.

The results obtained will be necessary in the development of recommendations to justify the optimal designs of the stope sill.

Keywords: cryolithozone, mining method, block caving, sublevel caving, ore drawing, modeling, stope sill design, freezing of broken ore

Acknowledgments: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0020, reg. No. 122011800086-1) shared core facilities of the Federal Research Center "Yakutsk Science Center SB RAS" grant No. 13.ЦКП.21.0016. The authors express their gratitude to colleagues for their assistance in conducting the research.

For citation: Petrov D.N., Zubkov V.P. Influence of stope sill design on the loss from freezing of muck during ore drawing in conditions of negative temperatures in the working excavation. *Russian Mining Industry*. 2023;(2):57–61. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-57-61>

Введение

Одним из путей повышения эффективности подземной разработки рудных месторождений полезных ископаемых Северо-Востока России, характеризующегося сложными климатическими, горно-геологическими и географическими условиями, является применение систем разработки с массовым обрушением и выпуском руды под налегающими породами, обеспечивающих высокую производительность и большие объемы добычи при относительно небольших затратах на основные процессы очистной выемки. Технология этажного и подэтажного обрушения с выпуском руды под налегающими обрушенными породами получила широкое распространение в мировой практике горного производства [1–3]. Вместе с тем данные системы разработки зачастую не позволяют обеспечить высокие показатели извлечения. Основной причиной высоких потерь и разубоживания, как правило, является применение конструктивных параметров системы разработки, не соответствующих конкретным горно-геологическим условиям [4–6].

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых криолитозоны ситуация усугубляется рядом факторов, связанных с отрицательными температурами массива горных пород и рудничной атмосферы. Одним из неблагоприятных факторов, связанных с наличием многолетней мерзлоты и суровыми природно-климатическими условиями, является возможность смерзания отбитой руды при выпуске. Исследованиями, проведенными сотрудниками ИГДС СО РАН, было установлено, что даже при незначительном увеличении влажности рудной массы и продолжительности ее нахождения в неподвижном состоянии смерзание отдельных участков отбитой руды в очистном пространстве приводит к существенному росту потерь при выпуске [7].

Характерной особенностью систем разработки этажного и подэтажного обрушения с донным выпуском руды является проведение выработок для выпуска и вторичного дробления в нижней части очистного блока. Конструктивное оформление днища очистного блока является одним из важнейших элементов технологии, влияющих на показатели извлечения при подземной разработке месторождений полезных ископаемых системами с обрушением руды и вмещающих пород с донным выпуском [8; 9]. Наиболее распространенными конструкциями днища в настоящее время являются различные варианты рудоприемных тран-

шей или воронок в сочетании с выпускными выработками, образованными в основании блока. Также конструкции днищ различаются расстоянием между выпускными выработками и их расположением относительно оси блока, углами наклона бортов рудоприемных выработок и их размерами. Выбор той или конструкции днища зависит главным образом от горно-геологических и горнотехнических условий [10; 11].

Методы исследования

Для определения влияния конструкции днища блока на показатели потерь отбитой руды от смерзания в очистном пространстве при выпуске в условиях подземной разработки месторождений криолитозоны были проведены исследования методом физического моделирования.

В качестве натурального объекта, как и при ранее выполненных исследованиях, был принят классический вариант системы разработки подэтажного обрушения руды и вмещающих пород с расположением камер по простиранию рудного тела и донным выпуском, примененный при подземной разработке Нежданнинского золоторудного месторождения, где при опытно-промышленных испытаниях данной системы разработки был установлен факт смерзания отбитой руды при выпуске [12].

Исследования являлись развитием ранее проведенных экспериментальных работ по определению закономерностей изменения показателей извлечения руды в зависимости от различных вариантов режима донного выпуска при подземной добыче полезных ископаемых месторождений криолитозоны. Для проведения исследований были приняты условия и масштабы подобию, рассчитанные и примененные при ранее проведенных экспериментах по физическому моделированию процесса донного выпуска руды. Порядок подготовки материалов и проведения экспериментов по физическому моделированию донного выпуска руды также был аналогичен предыдущему этапу исследований¹.

Для обеспечения магнитной сепарации при определении предельного разубоживания в дозе выпуска, в качестве обрушенных пород при моделировании был использован железистый кварцит. Слои отбитой руды формировались из мраморной крошки. Необходимый гранулометрический

¹ Разработка эффективной технологии отработки рудных тел Нежданнинского месторождения: отчет о НИР. ГИПРОЦВЕТМЕТ; рук. Бечаев М.Д.; исполн. Артемонов С. В. [и др.]. Чита, 1989. 120 с.

состав руды и породы обеспечивался классификацией на геологических ситах.

При проведении экспериментов использовался стенд для физического моделирования донного выпуска руды, использовавшийся при ранее проведенных исследованиях, представляющий собой конструкцию в виде призмы, стенки которой, изготовленные из прозрачного органического стекла, были закреплены на неподвижный металлический каркас и массивное основание. В стенд были внесены изменения, позволяющие установить днище блока требуемой конструкции, при сохранении общих геометрических пропорций и размеров стенда.

Результаты исследования

Для определения влияния рудоприемных выработок днища блока на показатели извлечения при выпуске в условиях отрицательной температуры очистного пространства и различном увлажнении отбитой руды (от 0 до 1%), были рассчитаны, сконструированы и изготовлены два варианта днища, устанавливаемого в стенд для моделирования выпуска руды.

Первое представляло собой траншею, соединенную с ортами-заездами (рис. 1).

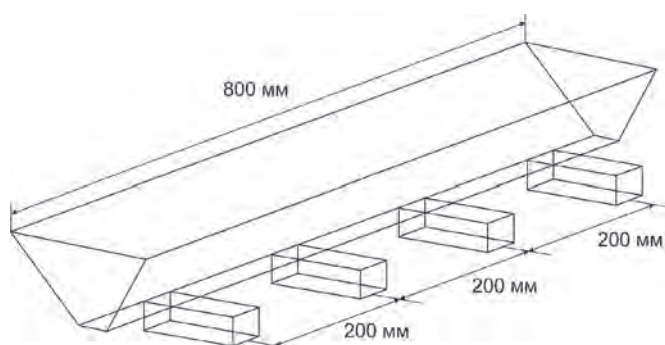


Рис. 1
Схема выработок днища блока (вариант траншея)

Fig. 1
Schematic diagram of mine workings of the stope sill (the trench option)

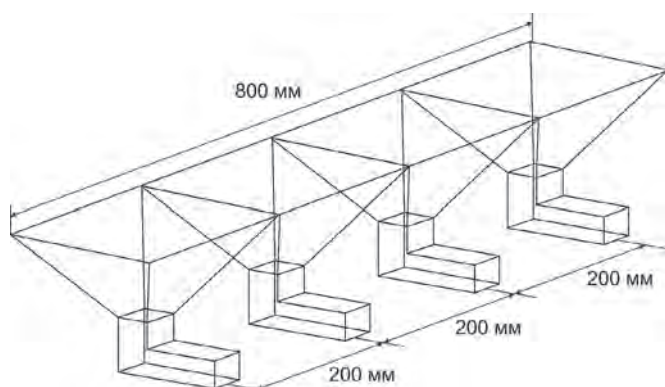


Рис. 2
Схема выработок днища блока (вариант воронки с дучками)

Fig. 2
Schematic diagram of mine workings of the stope sill (the bell and box hole option)

Конструктивные параметры рудоприемных выработок определялись с учетом размеров выработок днища блока, принятых при подземной разработке Нежданнинского

месторождения системой подэтажного обрушения с донным выпуском. Длина и ширина верхней части обоих вариантов днищ была одинаковой и равной длине и ширине основной части стенда, для удобства монтажа. Углы откоса бортов воронок и траншеи составляли 55°, расстояние между выпускными выработками – 200 мм, что с учетом геометрического масштаба подобия равно 10 м в натуральных условиях. Требуемый вариант днища монтировался в нижней части стенда на платформе из металлических уголков (рис. 3).



Рис. 3
Стенд в криокамере, подготовленный к проведению экспериментального выпуска руды

Fig. 3
A stand in a cryochamber prepared for an experimental ore drawing

Для каждой конструкции днища блока были выполнены три серии экспериментов по моделированию донного выпуска руды с различной степенью увлажнения (0, 0,5 и 1%).

Все эксперименты проводились в криокамере объемом 30 м³, оснащенной среднетемпературной сплит-системой «Polaris», позволяющей создать температурные условия подземной разработки месторождений криолитозоны. Для контроля температуры воздуха использовался стационарный термометр. Температуру руды и породы, а также стенок модели при проведении экспериментов измеряли тепловизором FLIR SC660 (рис. 4).

С учетом результатов предыдущих исследований был принят послойный режим выпуска, руда выпускалась из выработок дозами 50 г до достижения предельного разубоживания в дозе выпуска 80% либо до зависания рудной массы в очистном пространстве.

В результате проведенных исследований установлено, что при температуре –5 °С и изменении влажности рудной массы от 0 до 1% прирост потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве составляет для блока с донным выпуском через воронки и дучки 46%, для блока с траншейным выпуском – 22% (рис. 5).

Как известно, при выпуске сыпучих сред из отверстий в окружающем зону потока слое возникает динамический



Рис. 4
Температура отбитой руды в дучке при выпуске, зафиксированная с помощью тепловизора FLIR SC660

Fig. 4
Temperature of the broken ore in the box hole during drawing, recorded using the FLIR SC660 thermal imager

горизонтальный распор в результате образования над выпускными отверстиями разгружающегося свода или купола [13; 14]. Наблюдения за процессом выпуска показали, что при отсутствии увлажнения отбитой руды горизонтальный распор не оказывает существенного влияния на показатели извлечения (рис. 5). При увеличении влажности отбитой руды на 1% при температуре очистного пространства $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в области образования купола происходит ее смерзание. При выпуске через воронки и дучки интенсивность смерзания была значительно выше, чем при траншейной конструкции днища. Очевидно, при что выпуске через дучки величина горизонтального динамического распора в замкнутом пространстве воронки выше, чем в траншее, где отбитая руда ограничена только с двух плоскостей. Соответственно, возрастает уплотнение и растет число контактов смерзания между кусками руды. Все это приводит к сужению зоны потока руды, далее происходит быстрое проникновение налегающих пород, приводящее к предельному разубоживанию в дозе выпуска. Также было зафиксировано зависание руды в отдельных выработках вследствие ее смерзания с образованием купола из смерзшейся руды над дучкой.

Список литературы

1. Савич И.Н., Мустафин В.И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и подэтажном торцевом выпуске руды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S1):419–429.
2. Paredes P., Rodríguez F., Castro R., Morales D., García D. Design and evaluation of single-phase drawbell excavation at the Chuquicamata underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2019;119(12):1061–1070. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/682/2020>
3. Shekhar G., Gustafson A., Boeg-Jensen P., Malmgren L., Schunnesson H. Draw control strategies in sublevel caving mines – A baseline mapping of LKAB’s Malmberget and Kiirunavaara mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(7):723–733. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n7a6>
4. Козырев С.А., Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Волков А.В. Совершенствование технологии взрывной отбойки в системе разработки с подэтажным обрушением и торцовым выпуском руды на подземных рудниках Хибинских месторождений. *Горный журнал*. 2019;10:67–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.11.12>
5. Смирнов А.А., Барановский К.В. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами. *Проблемы недропользования*. 2022;(2):136–145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>
6. Skawina B., Greberg J., Salama A., Gustafson A. The effects of orepass loss on loading, hauling, and dumping operations and production rates in a sublevel caving mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(4):409–418. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n4a11>

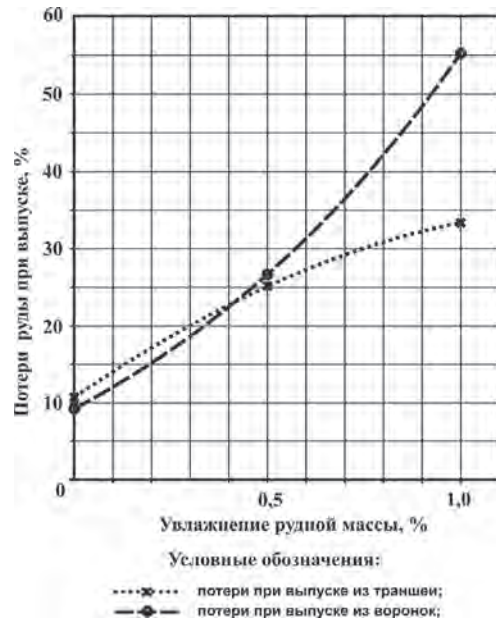


Рис. 5
Показатели потерь руды при выпуске вследствие ее смерзания в условиях отрицательных температур очистного пространства и увеличения влажности в зависимости от варианта конструкции днища

Fig. 5
Indicators of ore loss during drawing, due to its freezing in conditions of negative temperatures of the working excavation and an increase in humidity, depending on the stope sill design option

Заключение

Экспериментальными исследованиями на физической модели определены качественные закономерности изменения потерь отбитой руды от смерзания в очистном пространстве при выпуске в зависимости от конструктивного оформления днища блока. Установлено, что прирост потерь от смерзания для блока с донным выпуском через воронки и дучки в 2 раза превышает аналогичный показатель для блока с траншейной конструкцией днища.

Полученные результаты будут использованы при разработке рекомендаций по технологии выпуска руды, обеспечивающей безопасную и эффективную подземную отработку запасов месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны, в части обоснования оптимальных конструкций днища очистного блока.

7. Yu K., Ren F., Chitombo G., Puscasu R., Kang L. Optimum sublevel height and drift spacing in sublevel cave mining based on random medium theory. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(2):681–690. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00185-x>
8. Зубков В.П., Петров Д.Н., Необутов Г.П. Влияние влажности отбитой руды на потери в зависимости от времени ее нахождения в блоке до выпуска при разработке месторождений криолитозоны. *Успехи современного естествознания*. 2018;(5):71–75.
9. Никольский А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Тишков М.В., Семенов Д.П. Обоснование конструкций днищ блоков при системах разработки с камерно-целиковым порядком выемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(4):36–44. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-36-44>
10. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В. Рациональная конструкция траншейного днища для выпуска руды при отработке переходной зоны подземного рудника «Удачный». *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(1):106–117.
11. Гребенюк В.А., Пыжъянов Я.С., Ерофеев И.Е. (ред.) *Справочник по горнорудному делу*. М.: Недра; 1983. 816 с.
12. Именитов В.Р., Ковалев И.А., Уралов В.С. *Моделирование обрушения и выпуска руды*. М.: МГИ; 1961. 151 с.
13. Зубков В.П., Петров Д.Н. Влияние режима выпуска руды на потери от смерзания при подземной разработке месторождений криолитозоны. *Горная промышленность*. 2022;(2):76–80. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-76-80>
14. Дубынин Н.Г. *Выпуск руды при подземной разработке*. М.: Недра; 1965. 258 с.

References

1. Savich I.N., Mustafin V.I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel face draw. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015;(S1):419–429. (In Russ.)
2. Paredes P., Rodríguez F., Castro R., Morales D., García D. Design and evaluation of single-phase drawbell excavation at the Chuquicamata underground mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2019;119(12):1061–1070. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/682/2020>
3. Shekhar G., Gustafson A., Boeg-Jensen P., Malmgren L., Schunnesson H. Draw control strategies in sublevel caving mines – A base-line mapping of LKAB's Malmberget and Kiirunavaara mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(7):723–733. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n7a6>
4. Kozыrev S.A., Abrashitov A.Yu., Onuprienko V.S., Volkov A.V. Improvement of blasting technology in sublevel caving in the Khibiny mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019;10:67–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.11.12>
5. Smirnov A.A., Baranovsky K.V. Critical analysis of theoretical provisions on the production of ore under caved rocks. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(2):136–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>
6. Skawina B., Greberg J., Salama A., Gustafson A. The effects of orepass loss on loading, hauling, and dumping operations and production rates in a sublevel caving mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(4):409–418. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n4a11>
7. Yu K., Ren F., Chitombo G., Puscasu R., Kang L. Optimum sublevel height and drift spacing in sublevel cave mining based on random medium theory. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(2):681–690. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00185-x>
8. Zubkov V.P., Petrov D.N., Neobutov G.P. The influence of moist freed ore on losses compared to its time in the block before discharge during mining deposits of cryolithozone. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018;(5):71–75. (In Russ.)
9. Nikolsky A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., Tishkov M.V., Semenov D.P. Evaluation of bottom designs for extraction blocks in room-and-pillar mining. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018;(4):36–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-36-44>
10. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Baranovsky K.V. Rational design of ore discharge bottom in transition from open pit to underground mining in Udachny mine. *Journal of Mining Science*. 2013;49(1):90–98. <https://doi.org/10.1134/S1062739149010115>
11. Grebenyuk V.A., Pyzh'yanov Ya.S., Erofeev I.E. (eds) *Mining Handbook*. Moscow: Nedra; 1983. 816 p. (In Russ.)
12. Imenitov V.R., Kovalev I.A., Uralov V.S. *Simulation of the caving and ore drawing*. Moscow: Moscow Mining Institute; 1961. 151 p. (In Russ.)
13. Zubkov V.P., Petrov D.N. Influence of ore draw mode on freezing losses during underground mining of permafrost deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):76–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-76-80>
14. Dubynin N.G. *Ore draw during underground mining*. Moscow: Nedra; 1965. 258 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Петров Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук; г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: petrovdn74@mail.ru

Зубков Владимир Петрович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук; г. Якутск, Российская Федерация

Information about the authors

Dmitriy N. Petrov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: petrovdn74@mail.ru

Vladimir P. Zubkov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Science, Senior Researcher, Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.03.2023

Поступила после рецензирования: 04.04.2023

Принята к публикации: 10.04.2023

Article info

Received: 02.03.2023

Revised: 04.04.2023

Accepted: 10.04.2023