

Рекомендации по технологии выпуска руды, обеспечивающие минимальные показатели ее потерь от повторного смерзания в очистном пространстве

Д.Н. Петров, В.П. Зубков✉

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация
✉ zubkov@igds.ysn.ru

Резюме: В статье представлены рекомендации по эффективной технологии выпуска руды из блока при различных термо-влажностных условиях подземной отработки месторождений криолитозоны. Приведены результаты комплексного анализа данных, полученных при проведении экспериментальных и теоретических исследований влияния конструктивных и технологических параметров системы разработки на изменение показателей потерь руды вследствие ее смерзания при торцевом и донном выпуске. Представлены рекомендации по эффективной технологии торцевого и донного выпуска руды (режим, интенсивность выпуска, ширина, высота очистного пространства, способ оформления днища блока и т.д. в зависимости от влажности, температуры горных пород и очистного пространства), обеспечивающие минимальные показатели потерь рудной массы от ее смерзания в очистном пространстве, при подземной разработке рудных месторождений в зоне распространения многолетнемерзлых горных пород. Сформулированы рекомендации общего характера, применение которых предпочтительно при любых вариантах систем разработки, применяющих технологию выпуска руды под обрушенными налегающими породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны. Применение рекомендуемых технологических и организационных мероприятий позволит повысить эффективность и безопасность выпуска из очистного блока рудной массы, склонной к смерзанию, и обеспечить минимальные показатели потерь и разубоживания при подземной отработке рудных месторождений криолитозоны.

Ключевые слова: подземная разработка, рудные месторождения, криолитозона, выпуск руды, смерзание руды, потери рудной массы, технологические мероприятия, организационные мероприятия

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2026-0052, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 126021217278-1) с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН.

Авторы статьи выражают признательность коллегам, принимавшим участие в проведении исследований.

Для цитирования: Петров Д.Н., Зубков В.П. Рекомендации по технологии выпуска руды, обеспечивающие минимальные показатели ее потерь от повторного смерзания в очистном пространстве. *Горная промышленность*. 2026;(4):178–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-178-183>

Recommendations on ore drawing methods to minimize losses due to ore mass re-freezing in the stoping zone

D.N. Petrov, V.P. Zubkov✉

N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ zubkov@igds.ysn.ru

Abstract: The article presents recommendations on an efficient method for ore drawing from a block under various temperature and humidity conditions of underground mining of deposits in the cryolithic zone. The article presents the results of a comprehensive analysis of data obtained during experimental and theoretical studies of the effects caused by the design and technological parameters of the mining method on changes in the ore loss indicators due to its re-freezing during sublevel caving and bottom drawing. Recommendations are presented for an effective technology of sublevel caving and bottom ore drawing, i.e. the mode, draw rate, stope width and height, method of designing the bottom of the block, etc., depending on

the humidity, temperature of the rocks and the stope, that would ensure minimal ore losses from its re-freezing in the stope during underground mining of ore deposits in the permafrost zone. General recommendations have been formulated, which application is preferable for any of the mining methods that employ ore drawing under the caved overlying rocks during underground mining of ore deposits in the cryolithic zone. Application of the recommended technological and organizational measures will improve the efficiency and safety of drawing of ore masses prone to freezing inside the stoping zone while ensuring minimal losses and dilution during underground mining of ore deposits in the cryolithic zone.

Keywords: underground mining, ore deposits, cryolithic zone, ore drawing, ore freezing, ore losses, technological measures, organizational measures

Acknowledgments: The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No.FWRS-2026-0052, reg. No.126021217278-1) using the shared core facilities of the Federal Research Center "Yakutsk Science Center" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

The authors of the paper express their gratitude to the colleagues who participated in this research.

For citation: Petrov D.N., Zubkov V.P. Recommendations on ore drawing methods to minimize losses due to ore mass re-freezing in the stoping zone. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):178–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-178-183>

Введение

При подземной разработке рудных месторождений в нашей стране и за рубежом получили широкое распространение системы этажного и подэтажного обрушения с торцевым и донным выпуском [1–6] отбитой руды под налегающими обрушенными породами.

Применение данных технологий, позволяющих сократить затраты на управление горным давлением и доставку отбитой руды при очистной выемке в условиях Северо-Востока России, характеризующихся значительными затратами на обеспечение рудников материалами, оборудованием и электроэнергией, позволит значительно повысить рентабельность добычи [7; 8].

Вместе с тем необходимо учитывать конкретные местные условия ведения подземных горных работ в зоне распространения многолетнемерзлых горных пород. Опыт разработки рудных месторождений криолитозоны системами с массовым обрушением и выпуском руды показал, что одним из основных факторов, оказывающих существенное негативное влияние на показатели извлечения, является склонность отбитой руды к смерзанию в блоке в период очистной выемки. Данный фактор обуславливает необходимость разработки технологических и организационных мероприятий, позволяющих снизить негативное влияние данного фактора на показатели извлечения.

Несмотря на наличие исследований, связанных с оценкой условий возникновения и протекания процесса повторного смерзания рудной массы в очистном пространстве при выпуске [9; 10], рекомендации по снижению негативного воздействия фактора смерзания отбитой руды при выпуске под налегающими обрушенными породами практически отсутствуют.

На основе результатов исследования влияния конструктивных и технологических параметров системы разработки на изменение показателей потерь руды вследствие ее смерзания, выполненных в Институте горного дела Севера СО РАН в течение ряда лет, были разработаны рекомендации по эффективной технологии выпуска руды из блока при различных термо-влажностных условиях подземной отработки месторождений криолитозоны.

Методы и материалы

На первом этапе работы был выполнен комплексный анализ результатов ранее проведенных экспериментальных и теоретических исследований влияния конструктивных и технологических параметров системы разработки на изменение показателей потерь руды вследствие ее смерзания при торцевом выпуске.

Экспериментальными исследованиями торцевого выпуска при системах с подэтажным обрушением были установлены закономерности изменения показателей потерь руды вследствие ее смерзания при изменении влажности, дозы (интенсивности) выпуска от параметров отбиваемого слоя (ширина, высота, угол наклона), расстояния между буро-доставочными выработками. Также был установлен характер влияния степени минерализации поровой влаги в отбитой руде на ее потери вследствие смерзания при выпуске. Подготовка материала и эксперименты по выпускам руды под обрушенными породами проводились в криокамере, позволяющей воспроизвести условия подземной разработки рудных месторождений криолитозоны при температуре -5°C . Краткие результаты исследований приведены в табл. 1.

Следующий этап исследований был направлен на определение изменения показателей извлечения отбитой руды, склонной к повторному смерзанию, при донном выпуске ее из блока в условиях криолитозоны.

Экспериментальными исследованиями методом физического моделирования были установлены закономерности изменения потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве от режима выпуска, конструкции днища блока, температуры и влажности рудной массы и очистного пространства. Также были выполнены эксперименты по определению влияния смерзания руды при ее выпуске из очистного блока в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны на форму и размеры зоны потока при донном выпуске. Основные результаты исследований приведены в табл. 2.

На заключительном этапе исследований на основе комплексного анализа данных экспериментальных исследований и научно-технической литературы, базирующихся на результатах применения систем разработки с выпуском

Таблица 1
Основные результаты экспериментальных исследований
торцевого выпуска руды в условиях подземной отработки
месторождений криолитозоны

Table 1
Key results of experimental studies into the sublevel caving
of ore in underground mining of deposits in the cryolithic zone

Параметры*	Результаты экспериментальных исследований
Доза (интенсивность) выпуска отбитой руды	Увеличение дозы выпуска отбитой руды в 2 раза (с 7 до 14 т) в условиях отрицательных температур очистного пространства (–5 °С) и при изменении ее влажности от 0 до 1,0% приводит к снижению потерь рудной массы вследствие смерзания (с 34 до 14%)
Мощность и высота выпускаемого слоя рудной массы	Установлено, что при уменьшении высоты подэтажа с 20 до 15 м и изменении ее влажности от 0 до 1,0% возрастание потерь выпускаемой руды вследствие смерзания достигает 21%, при изменении мощности выпускаемого слоя с 3,0 до 6,0 м в аналогичных условиях увеличение потерь руды при выпуске в среднем составляет 9%
Угол наклона отбиваемого слоя руды	Изменение угла наклона отбиваемого слоя руды с 90 до 85° и ее влажности от 0 до 0,5% не оказывает существенного влияния на увеличение потерь, резкое повышение потерь руды вследствие ее смерзания при выпуске (до 12,5%), отмечено при угле наклона 80° и ниже (до 75°)
Расстояние между буро-доставочными выработками	При увеличении расстояния между буро-доставочными выработками в 2 раза и изменении ее влажности от 0 до 1,0% происходит возрастание потерь выпускаемой руды вследствие смерзания на 21%
Степень минерализации поровой влаги в отбитой руде	Установлено, что при применении 10-процентного раствора хлорида кальция (CaCl ₂) в количестве 2,5 л/т при выпуске отбитой руды с влажностью 1,0% происходит значительное снижение ее потерь от смерзания (на 20,7%). Дальнейшее увеличение расхода раствора до 10 л/т приводит к снижению сыпучих свойств руды и возрастанию ее потерь в блоке (с 13,5 до 24%). Применение 15-процентного раствора хлорида натрия (NaCl) при аналогичных параметрах влажности при расходе 5 л/т приводит к снижению потерь выпускаемой руды вследствие смерзания на 16,5%. Увеличение расхода раствора до 10 л/т приводит к значительному возрастанию потерь (до 48%)

Примечание. * Влияние этих параметров на показатели извлечения определялось экспериментальными исследованиями.
Note. * The effect of these parameters on the recovery rates was determined through experimental studies.

Таблица 2
Основные результаты экспериментальных исследований
донного выпуска руды в условиях подземной отработки
месторождений криолитозоны

Table 2
Key results of experimental studies into the bottom ore drawing
in underground mining of deposits in the cryolithic zone

Параметры*	Результаты экспериментальных исследований
Режим выпуска отбитой руды	В условиях отрицательных температур очистного пространства и массива горных пород (–5 °С) увеличение влажности отбитой руды на 1% приводит к росту потерь от смерзания при послойном режиме на 22,0%, а при равномерно-последовательном и хаотичном режимах выпуска на 29,0–30,0%
Конструкция днища блока	Установлено, что при температуре очистного пространства –5 °С и увлажнении рудной массы на 1% прирост потерь рудной массы от смерзания составляет для блока с донным выпуском через воронки и дучки 45,8%, для блока с траншейным выпуском 21,7%
Расстояние между выпускными выработками	При изменении расстояния между ортами-заездами при траншейной конструкции днища блока с 9 до 11 м потери рудной массы от смерзания при выпуске снижаются с 42 до 24%
Температура и влажность рудной массы и очистного пространства	Установлено, что при повышении влажности отбитой руды на 1% потери от ее смерзания возникают при температуре очистного пространства –1 °С и возрастают при дальнейшем понижении до –5 °С более чем в 4 раза, при температуре –7 °С происходит зависание руды в очистном блоке. При выпуске руды без увлажнения при аналогичном понижении температуры смерзания рудной массы не происходит
Влияние смерзания руды на параметры фигуры выпуска	Установлено, что при выпуске руды в условиях отрицательной температуры очистного пространства (–5 °С) при увлажнении на 1% критическая высота выпуска равна высоте эллипсоида выпуска, а максимальный горизонтальный диаметр эллипсоида выпуска уменьшается на 25%. Параметры воронки внедрения при этом различаются незначительно

Примечание. * Влияние этих параметров на показатели извлечения определялось экспериментальными исследованиями.
Note. * The effect of these parameters on the recovery rates was determined through experimental studies.

Таблица 3
Рекомендации по обеспечению безопасного и эффективного
выпуска руды в условиях подземной отработки месторождений
криолитозоны

Table 3
Recommendations for ensuring safe and efficient ore drawing
in underground mining of deposits in the cryolithic zone

Виды выпуска руды	Рекомендации
Любые варианты систем разработки, применяющих технологию выпуска руды под обрушенными налегающими породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны	Обязательное соблюдение теплового режима шахты, предписанного в проектной документации
	Предусмотреть в проектной документации возможности оперативного изменения организационных и технологических параметров применяемой системы разработки при изменении термо-влажностных условий, особенно при приближении подземных горных работ к нижним границам толщи многолетнемерзлых горных пород
	Постоянный мониторинг температуры и влажности массива руды и породы, рудной массы и рудничного воздуха. При изменении термо-влажностных условий, в особенности при приближении подземных горных работ к нижним границам толщи многолетнемерзлых горных пород, следует применить рекомендуемые ниже мероприятия в зависимости от варианта применяемой системы разработки
	Максимально возможное сокращение времени нахождения отбитой руды в очистном блоке путем оптимизации схемы проветривания, сокращения продолжительности подготовительных операций, исключения простоев погрузочно-доставочных машин
	С целью снижения потерь отбитой руды вследствие ее смерзания при выпуске рекомендуется сокращение расстояния между буро-доставочными выработками до минимально допустимых значений по требованиям Правил безопасности с одновременным усилением несущей способности рудных целиков или возведением искусственных целиков между буро-доставочными выработками
	Двукратное увеличение дозы (интенсивности) выпуска в блоках, опасных по возникновению смерзания отбитой руды в очистном пространстве (применение более мощных погрузочно-доставочных машин или увеличение их количества)
Торцевой выпуск	Для снижения потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве рекомендуется увеличить высоту отбиваемого слоя. Оптимальное соотношение толщины отбиваемого слоя к его высоте составляет 1:7
	Угол наклона отбиваемого слоя рекомендуется формировать равным 90°
	В блоках, опасных по возникновению смерзания отбитой руды в очистном пространстве, рекомендуется выполнить мероприятия по обработке реагентами, повышающими минерализацию поровой влаги (Патент RU 2815126 C1)
Донный выпуск	Для снижения потерь рудной массы от смерзания в очистном пространстве предпочтительным является применение послойного режима выпуска отбитой руды из блока
	Оптимальной конструкцией днища очистного блока, обеспечивающей минимизацию потерь выпускаемой рудной массы от ее смерзания, является траншея в сочетании с ортами-заездами
	Для изменения конструктивных параметров и расположения очистных камер, а также ориентировочной оценки потерь от смерзания отбитой руды при выпуске использовать полученные в результате исследований зависимости изменения критической высоты и размеров эллипсоида выпуска в зависимости от ее влажности в условиях отрицательного температурного режима очистного пространства

руды под обрушенными вмещающими породами [11–14], были разработаны рекомендации по технологии выпуска руды в условиях криолитозоны, направленные на снижение негативного эффекта от повторного смерзания рудной массы в очистном пространстве.

Результаты

Анализ результатов многолетних исследований влияния конструктивных и технологических параметров систем разработки на показатели полноты и качества извлечения блоковых запасов руды вследствие ее смерзания в условиях отрицательных температур очистного пространства

позволил разработать рекомендации по эффективной технологии торцевого и донного выпуска руды, склонной к повторному смерзанию (режим, интенсивность выпуска, ширина, высота очистного пространства, способ оформления днища блока и т.д. в зависимости от влажности, температуры горных пород и очистного пространства), обеспечивающие минимальные показатели потерь и разубоживания при подземной разработке рудных месторождений в зоне многолетнемерзлых горных пород. Также были сформулированы рекомендации общего характера, применение которых предпочтительно при любых вариантах систем разработки, применяющих технологию вы-

пуска руды под обрушенными налегающими породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны (табл. 3).

**Ограничения исследования
и обобщение его результатов,
предложения по практическому применению**

Для более эффективного использования представленных рекомендаций при проектировании процессов выпуска и расчетах конструктивных элементов систем разработки, применяющих выпуск отбитой руды при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны, необходимы анализ конкретных горно-геологических и термомеханических условий применения и уточнение параметров.

**Предложения по направлению
будущих исследований**

Смерзание отбитой руды в очистном пространстве при выпуске является существенным фактором, оказывающим негативное влияние на эффективность разработки месторождений криолитозоны, и мероприятий по минимизации ущерба от него недостаточно. Более эффективным направлением решения данной проблемы является

профилактика повторного смерзания рудной массы в очистном пространстве, для чего необходимы дальнейшие теоретические изыскания, лабораторные эксперименты и натурные исследования непосредственно на объектах разработки.

Заключение

Представленные рекомендации основаны на принципах обеспечения минимальных показателей потерь руды вследствие ее смерзания при выпуске с использованием известных технологических и организационных мероприятий, разработанных на основе результатов исследования влияния конструктивных и технологических параметров системы разработки на изменение показателей извлечения при различных термо-влажностных условиях подземной отработки рудных месторождений криолитозоны, полученных впервые.

Применение рекомендуемых технологических и организационных мероприятий позволит повысить эффективность и безопасность выпуска из очистного блока рудной массы, склонной к смерзанию, и обеспечить минимальные показатели потерь и разубоживания при подземной отработке рудных месторождений криолитозоны.

Список литературы / References

1. Касько А.О., Степанов Г.Д., Горбунов К.В. Рудник «Северный» АО «Кольская ГМК»: применяемые технологии и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса. *Горный журнал*. 2024;(12):10–13.
Kasko A.O., Stepanov G.D., Gorbunov K.V. The Severny Ore Mine, the Kola GSK JSC: technologies used and prospects for the development of the mineral resources complex. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(12):10–13. (In Russ.)
2. Nyarela M.S., Khumalo R.B., Drawpoint loading optimization strategies in block caving: A case study of Palabora Mining Company. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022;122(11):639–646. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1664/2022>
3. Савич И.Н., Бекбергенов Д.К., Насыров Р.Ш., Джангулова Г.К. Перспективы применения систем с самообрушением руды при искусственном днище блоков на глубоких горизонтах Донского хромитового рудника. *Горный журнал*. 2022;(2):35–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.02.06>
Savich I.N., Bekbergenov D.K., Nasyrov R.Sh., Dzhangulova G.K. Prospects for application of mining systems with caving in stoping blocks with manmade bottoms at deep levels in Donskoe Chromite Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(2):35–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.02.06>
4. Gómez R., Castro R., Betancourt F., Moncada M. Comparison of normalized and non-normalized block caving comminution models. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;121(11):581–588. Available at: <https://www.saimm.co.za/Journal/v121n11p581.pdf> (accessed: 24.03.2026).
5. Manzoor S., Gustafson A., Johansson D., Schunnesson H. Rock fragmentation variations with increasing extraction ratio in sublevel caving: a case study. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2022;36(3):159–173. <https://doi.org/10.1080/17480930.2021.2000826>
6. Khodayari A., Xu C., Dare-Bryan P., Dowd P., Lapcevic V., Metcalfe A. Impact of blast design parameters on rock fragmentation in sub-level caving: A multivariate regression approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2026;18(5):3348–3364. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.07.038>
7. Уваров И.И., Федорец Д.Ю., Мильков А.С., Марысюк В.П. Первый рудник Норильска «Заполярный» отмечает 80-летний юбилей. *Горный журнал*. 2025;(9):5–12. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.01>
Uvarov I.I., Fedorets D.Yu., Milkov A.S., Marysyuk V.P. Norilsk's first underground mine, Zapolyarny Mine, celebrates its 80th anniversary. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(9):5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.09.01>

8. Петров Д.Н., Необутов Г.П. Опыт и перспективы применения систем с подэтажным обрушением при разработке рудных месторождений Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S24):211–219. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-211-219>
Petrov D.N., Neobutov G.P. Experience and prospects of sublevel caving mining of ore deposits in Yakutia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S24):211–219. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-24-211-219>
9. Хохолов Ю.А., Каймонов М.В., Курилко А.С., Шубин Г.В. Влияние депрессии рудничной вентиляции на накопление льда в очистном блоке с отбитой мерзлой рудой. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(11):405–408.
Khokholov Yu.A., Kaimonov M.V., Kurilko A.S., Shubin G.V. Influence of mining ventilation depression on ice accumulation in a cleaning block with beated frozen ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(11):405–408. (In Russ.)
10. Курилко А.С., Каймонов М.В. К вопросу вторичного смерзания минерального сырья в процессе его добычи на рудниках Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005;(3):290–297.
Kurilko A.S., Kaimonov M.V. On the issue of secondary freezing of mineral raw materials in the process of their extraction in the mines of the North. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005;(3):290–297. (In Russ.)
11. Петров Д.Н., Зубков В.П. Влияние влажности и температуры на параметры фигуры выпуска отбитой руды, склонной к смерзанию. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024;(10):103. <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.17>
Petrov D.N., Zubkov V.P. Influence of humidity and temperature on the parameters of the dumbbed ore loading shape prone to freeze-up. *International Research Journal* 2024;(10):103. (In Russ.) <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.17>
12. Смирнов А.А., Барановский К.В., Рожков А.А. Уточнение методики расчета показателей извлечения с учетом увеличенного расстояния между выработками выпуска руды. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2025;(1):611–625.
Smirnov A.A., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Clarification of the methods for definition recovery indicators taken into account of increased distance between ore draw points. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2025;(1):611–625. (In Russ.)
13. Голик В.И., Белодедов А.А., Логачев А.В., Шурыгин Д.Н. Совершенствование параметров выпуска руд при подэтажном обрушении с торцовым выпуском. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;(1):150–159.
Golik V.I., Belodedov A.A., Logachev A.V., Shurygin D.N. Improvement of parameters of production of ores at the subfloor collapse with face release. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(1):150–159. (In Russ.)
14. Shekhar G., Gustafson A., Schunnesson H. *Draw control strategy and resource efficiency in sublevel caving: state-of-the-art*. Luleå University of Technology; 2017. 85 p. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:998529/FULLTEXT03.pdf> (accessed: 20.02.2026).

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, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук; г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0002-4402-7128>; e-mail: zubkov@igds.ysn.ru

Information about the authors

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

Vladimir P. Zubkov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Director for Science, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0002-4402-7128>; e-mail: zubkov@igds.ysn.ru

Article info

Received: 04.03.2026

Revised: 04.05.2026

Accepted: 18.05.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.03.2026

Поступила после рецензирования: 04.05.2026

Принята к публикации: 18.05.2026