

Влияние температуры очистного пространства на потери рудной массы от ее смерзания при донном выпуске под налегающими обрушенными породами

В.П. Зубков, Д.Н. Петров 

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

Резюме: В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры очистного пространства на показатели потерь при донном выпуске руды под налегающими обрушенными породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны. В результате проведенных экспериментов установлено, что при выпуске рудной массы с влажностью 1% потери от ее смерзания возникают при понижении температуры очистного пространства до -1°C и возрастают при дальнейшем понижении до -5°C более чем в 4 раза. При выпуске рудной массы с влажностью 1% и понижении температуры очистного пространства до -7°C происходит остановка выпуска вследствие зависания руды в очистном блоке в результате ее смерзания. При выпуске руды без увлажнения при аналогичном понижении температуры значительного возрастания потерь не происходит. Полученные результаты позволяют объяснить механизм образования потерь отбитой руды от смерзания при выпуске, определить температурные границы их возникновения, а также предельные значения температуры очистного пространства, при которых выпуск руды из блока становится невозможным.

Ключевые слова: подземная разработка, рудные месторождения, криолитозона, температура очистного пространства, выпуск руды, моделирование донного выпуска руды, смерзание рудной массы, потери рудной массы

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

Для цитирования: Зубков В.П., Петров Д.Н. Влияние температуры очистного пространства на потери рудной массы от ее смерзания при донном выпуске под налегающими обрушенными породами. *Горная промышленность*. 2025;(5):79–83.
<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-79-83>

Influence of the stope temperature on the loss of ore mass due to its freezing in bottom ore drawing under overlying broken rocks

В.П. Zubkov, Д.Н. Petrov 

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

Abstract: The article presents the results of experimental studies of the effect of the stope temperature on the loss rates during bottom ore drawing under overlying broken rocks in underground mining of ore deposits in the cryolithozone. As a result of the experiments, it was found that when drawing ore mass with the moisture content of 1%, losses due to its freezing occur when the stope temperature drops to -1°C and with a further decrease to -5°C the losses increase more than 4 times. When the ore mass with the moisture content of 1% is drawn at the stope temperature of -7°C , the drawing stops completely as the result of the ore hang-ups in the stope due to its freezing. When the ore is drawn without watering, no significant increase in losses takes place with a similar decrease in the temperature. The results obtained make it possible to explain the mechanism of the broken ore losses due to freezing during drawing, to determine the temperature limits of their occurrence, as well as the limits of the stope temperature at which ore drawing from the stope becomes impossible.

Keywords: underground mining, ore deposits, cryolithozone, stope temperature, ore drawing, modeling of the bottom ore drawing, freezing of the ore mass, losses of the ore mass

Acknowledgements: The authors of the article express their gratitude to their colleagues who participated in the research. 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.

For citation: Zubkov V.P., Petrov D.N. Influence of the stope temperature on the loss of ore mass due to its freezing in bottom ore drawing under overlying broken rocks. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):79–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-79-83>

Введение

Освоение рудных месторождений северо-восточных регионов России подземным способом разработки связано со значительными затратами на транспортировку материалов, оборудования, обеспечения электроэнергией, что отрицательно оказывается на рентабельности добычи. Соответственно, выбор и адаптация под местные конкретные условия технологий, позволяющих сократить затраты на отдельные процессы и подземные горные работы в целом, в условиях криолитозоны приобретает особое значение. Одним из путей, позволяющих сократить затраты на управление горным давлением и доставку отбитой руды при очистной выемке, является применение различных вариантов систем разработки с выпуском руды под налегающими обрушенными породами, особенно при разработке месторождений бедных руд.

При подземной разработке рудных месторождений в нашей стране и за рубежом получили широкое распространение системы этажного и подэтажного обрушения с торцевым [1–3] и донным выпуском [4–6] отбитой руды под налегающими обрушенными породами.

Основным отличием систем разработки с обрушением и донным выпуском руды от аналогичной технологии с торцевым выпуском является конструктивное оформление днища очистного блока или панели в видеrudоприемных траншей или воронок в сочетании с выпускными выработками, соединенных с доставочными штреками ортами-зазездами. Наличие подготовленных выработок днища позволяет обеспечить высокую производительность выпуска руды, по сравнению с торцевым. При этом эффективность подземной разработки месторождений полезных ископаемых системами, в которых применяется донный выпуск отбитой руды под обрушенными налегающими породами, существенно зависит от учета факторов, оказывающих влияние на параметры зоны потока рудной массы [7–9].

В условиях криолитозоны дополнительным важным фактором являются термовлажностные характеристики массива руды, вмещающих пород, рудной массы и рудничного воздуха на этапе выпуска отбитой руды из блока. Результаты исследований и оценка опыта применения технологии выпуска отбитой руды при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны показывают, что при возникновении определенных термовлажностных характеристик очистного пространства может происходить смерзание кусков рудной массы между собой, приводящее к зависанию руды в выпускных выработках и полному прекращению выпуска¹ [10].

Исследователи, занимавшиеся данным вопросом, основной причиной этого явления считают конденсацию влаги на кусках руды из рудничного воздуха. При отрицательной температуре массива обрушенных горных пород и отбитой

руды влага, сконденсированная на поверхности кусков из поступающего более теплого воздуха, превращается в лед, приводя к их смерзанию между собой [11].

Результаты исследований влияния влажности и времени нахождения рудной массы в неподвижном состоянии при отрицательной температуре в очистном пространстве на показатели ее извлечения показали, что незначительное увлажнение и снижение интенсивности выпуска отбитой руды приводят к значительному возрастанию ее потерь от смерзания при выпуске [12].

Показатели температуры очистного пространства при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны существенно различаются в зависимости от географического положения, климатических условий и применяемого теплового режима шахт. Например, температуры массива горных пород рудных месторождений Якутии изменяются от $-4 - -5^{\circ}\text{C}$ (Юрское, Дузтское месторождения) до $-10 - -12^{\circ}\text{C}$ (Кыллахское –месторождение) [13]. Также температура массива горных пород при разной глубине разработки месторождения изменяется значительно. Замеры температуры в подземных горных выработках на золоторудном месторождении Бадран показали, что температура многолетнемерзлых горных пород в зависимости от глубины разработки изменяется от -8°C на 50 м, до 0°C на 400 м [14].

Целью исследования являлось определение влияния температуры очистного пространства на показатели потери от смерзания рудной массы при донном выпуске под налегающими обрушенными породами. Для определения зависимости было проведено физическое моделирование процесса донного выпуска под налегающими породами при различной температуре в интервале, характерном для большинства рудных месторождений криолитозоны.

Методы

Экспериментальные работы по определению влияния температуры очистного пространства на потери руды от смерзания являлись продолжением исследований по определению факторов, оказывающих влияние на эффективность и безопасность процесса выпуска руды под налегающими обрушенными породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны. Условия, масштабы подобия, порядок подготовки и проведения экспериментов по физическому моделированию были приняты аналогичными предыдущим этапам исследований. Экспериментальные выпуски проводились на стенде для физического моделирования донного выпуска руды, также использовавшегося при ранее проведенных исследованиях [12].

Эксперименты проводились в криокамере, оснащенной среднетемпературной сплит-системой «Polaris», что позволило воспроизвести температурные условия очистного пространства при подземной разработке рудных месторождений зоны распространения многолетнемерзлых горных пород.

¹ Технологический регламент для разработки технического проекта Нежданинского ГОКа в Якутской АССР по технологии подземных горных работ. Чита: ЧФ ВНИПИГорцветмет; 1986. 76 с.; Разработка эффективной технологии отработки рудных тел Нежданинского месторождения: отчет о НИР. Чита; 1989. 120 с.

Контроль температуры воздуха обеспечивался температурными датчиками сплит-системы криокамеры и стационарным термометром. Во время подготовки и проведения экспериментов выполнялись замеры температур руды и породы, а также стенок модели тепловизором «FLIR SC660» и лабораторным электронным термометром «ЛТ-300».

Подготовка материала, используемого в качестве отбитой руды (мраморная крошка) и обрушенных пород (железистый кварцит), заключалась в классификации на геологических ситах требуемого гранулометрического состава. Так же как и при ранее проведенных экспериментах, диаметр кусков рудного материала изменялся от 1 мм до 5 мм; обрушенных вмещающих пород – от 1 мм до 15 мм. Далее материал в объеме, необходимом для проведения экспериментов, распределялся в пластиковые лотки слоями высотой 100 мм и размещался в криокамере для набора необходимой температуры.

Эксперимент производился следующим образом. После набора материалом требуемой температуры в специальном лотке выполнялось увлажнение руды при помощи пульверизатора (мб пульверизатор) с одновременным перемешиванием, затем рудный материал размещался в стенде слоями высотой 10 см. После размещения всего объема рудного материала в стенде в него загружался породный материал до заполнения.

Для сближения подобия продолжительности технологическому процессу в натурных условиях заполненный стенд выдерживался неподвижно в течение 9 мин, что в принятом масштабе времени $C_t = \sqrt{C_L} = 7$ равно межсменному перерыву 1 ч, используемому для проветривания перед выпуском.

Выпуск руды проводился в послойном режиме. Доза выпуска составила 100 г. Выпуск выполнялся из первой выработки до достижения разубоживания в дозе выпуска значения 80% или до момента зависания. После этого начинали выпуск из следующей выработки и так далее.

Было выполнено 5 серий экспериментальных выпусков для руды, увлажненной на 1% (при температуре воздуха в криокамере +1°C, -1°C, -3°C, -5°C и -7°C), и 2 серии выпусков руды без увлажнения (при температуре воздуха в криокамере +1°C и -7°C). Температура рудного и породного материала была равной температуре воздуха в криокамере. Степень увлажнения рудного материала была принята исходя из анализа предыдущих исследований, показавшего, что процесс смерзания кусков руды между собой начинается при увеличении влажности на 1% [12].

Для каждой дозы выпуска выполнялось отделение премешанной пустой породы способом магнитной сепарации и ее взвешивание. Все полученные данные фиксировались в контрольном журнале проведения испытаний. Эксперимент завершался после остановки выпуска рудной массы из последней выработки.

Обработка данных, полученных в результате проведенных экспериментальных выпусков, проводилась в три этапа. На первом этапе обрабатывались результаты отдельных экспериментальных выпусков. На втором выполнялась группировка и обработка результатов определения показателей извлечения по сериям экспериментов с учетом условий проведения эксперимента. На третьем этапе проводились анализ и обобщение полученных данных в целом.

Результаты

По результатам проведенных экспериментальных исследований был построен график изменения потерь отбитой руды при ее выпуске из блока в зависимости от темпе-

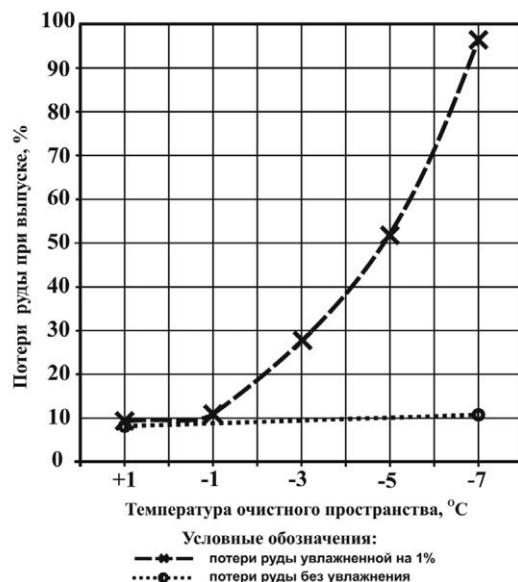


Рис. 1
Динамика изменения потерь отбитой руды при ее выпуске из блока на физической модели при различной отрицательной температуре и влажности

Fig. 1
Dynamics of changes in the broken ore losses when it is drawn from the block using a physical model at various negative temperatures and moisture contents

туры очистного пространства и влажности рудной массы (рис. 1).

Проведенные эксперименты показали, что при выпуске рудной массы с влажностью 1% потери от ее смерзания возникают при понижении температуры очистного пространства до -1 °C и возрастают при дальнейшем понижении до -5 °C более чем в 4 раза. При выпуске рудной массы с влажностью 1% и понижении температуры очистного пространства до -7 °C происходит остановка выпуска вследствие зависания руды в очистном блоке в результате ее смерзания. При выпуске руды без увлажнения при аналогичном понижении температуры значительного возрастания потерь не происходит.

Обсуждение результатов

В ходе проведения экспериментов было зафиксировано, что при выпуске увлажненной рудной массы при отрицательной температуре на границе отбитой руды и налегающей обрушенной породе образуются скопления влаги.



Рис. 2
Выпуск руды из стендов в криокамере увлажненной руды при температуре -5°C

Fig. 2
Drawing of the watered ore in a test bench inside a cryochamber at the temperature of -5°C



Рис. 3
Выпуск руды из стенда
в криокамере при температуре
–7°C без увлажнения

Fig. 3
Drawing of ore in a test bench
inside a cryochamber at the
temperature of –7°C without
watering

ющих обрушенных пород образуется зона повышенной влажности (рис. 2). Влага, сконцентрированная в указанных местах на границе руды и налегающими породами, замерзает, что приводит к образованию участков смерзшейся руды.

При выпуске руды без увлажнения скопления влаги на границе между отбитой рудой и налегающими обрушенными породами не возникало (рис. 3).

Очевидно, что смерзание сконцентрированной на границах руды и налегающих пород влаги с возникновением

клластеров смерзшейся руды приводит к существенному уменьшению горизонтального диаметра эллипсоида выпуска и, соответственно, росту ее потерь при выпуске.

Ограничения исследования и обобщение его результатов и предложения по практическому применению

Хотя результаты моделирования справедливы только для конкретных условий проведенных экспериментов и не могут напрямую использоваться в расчетах, их необходимо учитывать при проведении изыскательских исследований, проектировании процессов выпуска и расчетах конструктивных элементов систем разработки, применяющих выпуск отбитой руды при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны.

Предложения по направлению будущих исследований

Для решения проблемы смерзания рудной массы при выпуске из очистного пространства необходим комплексный подход, включающий как теоретические исследования и лабораторные эксперименты, так и натурные изыскания непосредственно на объектах разработки, в том числе и с учетом динамики подземных горных работ.

Заключение

Таким образом, экспериментальными исследованиями влияния температуры очистного пространства на показатели потерь от смерзания при донном выпуске руды под налегающими обрушенными породами в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны установлено, что при выпуске рудной массы влажностью 1% и понижении температуры очистного пространства с –1 °C до –5 °C потери от ее смерзания возрастают более чем в 4 раза, при –7 °C происходит прекращение выпуска вследствие зависания отбитой руды в очистном блоке. При выпуске руды без увлажнения с понижением температуры показатели потерь изменяются незначительно.

Полученные результаты подтверждают необходимость учета изменений температуры и влажности рудничного воздуха, обрушенных пород и отбитой руды и разработки эффективных методов и средств оценки, профилактики и контроля смерзания рудной массы при применении систем разработки с обрушением и выпуском руды в условиях подземной разработки месторождений криолитозоны.

Список литературы / References

1. Shekhar G., Gustafson A., Boeg-Jensen P., Malmgren L., Schunnesson H. Draw control strategies in sublevel caving mines – A baseline mapping of LKAB's Malmbärgen 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>
2. 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 Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. *Nauki o Zemle*. 2018;(1):150–159. (In Russ.)
3. 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>
4. 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. Available at: <https://scielo.org.za/pdf/jsaimm/v119n12/10.pdf> (accessed: 14.02.2025).

5. Бекбергенов Д.К. Особенности технологии повторной добычи руд в условиях обрушенного района подземным способом на примере Жезказганского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S3):3–14.
Bekbergenov D.K. Features of the re-mining of ores in collapsed area underground method on the example of the Zhezkazgansky deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S3):3–14. (In Russ.)
6. Эвертовский В.М. Системы подземной отработки с массовым обрушением руды. *Золотодобыча*. 2014;(12). Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/11164> (дата обращения: 02.03.2022).
Evertovskii V.M. Mass caving methods in underground ore mining. *Zolotodobycha*. 2014;(12). (In Russ.) Available at: <https://zolotodb.ru/article/11164> (accessed: 02.03.2022).
7. 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>
8. Смирнов А.А., Барановский К.В. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами. *Проблемы недропользования*. 2022;(3):136–145. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>
Smirnov A.A., Baranovsky K.V. Critical analysis of theoretical provisions on the production of ore under caved rocks. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(3):136–145. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.136>
9. Балек А.Е., Сашурин А.Д., Харисов Т.Ф. Совершенствование подземной разработки Соколовского месторождения системами с обрушением в условиях обводненных налегающих пород. *Проблемы недропользования*. 2019;(1):5–13. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/385> (дата обращения: 25.05.2025).
Balek A.E., Sashurin A.D., Kharisov T.F. Improvement of underground mining of Sokolovskoe deposit by systems with caving under conditions of watered overlying rocks. *Problems of Subsoil Use*. 2019;(1):5–13. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/index.php/psu/article/view/385> (accessed: 25.05.2025).
10. 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.)
11. 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.)
12. 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>
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>
13. Необутов Г.П., Гринев В.Г. *Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 1997. 104 с.
14. Петров Д.Н. Влияние изменения прочности многолетнемерзлых горных пород с глубиной разработки на параметры крепления подземных горных выработок. В кн.: Чемезов Е.Н. (ред.) *Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию д-ра техн. наук, проф., действительного члена Академии горных наук РФ Е.Н. Чемезова, г. Якутск, 25 апр. 2018 г.* Якутск: Издат. дом СВФУ; 2018. С. 286–291.

Информация об авторах

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; e-mail: zubkov@igds.ysn.ru

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

Information about the authors

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; e-mail: zubkov@igds.ysn.ru

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.05.2025
Поступила после рецензирования: 10.07.2025
Принята к публикации: 16.07.2025

Article info

Received: 23.05.2025
Revised: 10.07.2025
Accepted: 16.07.2025