

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАРАМЕТРЫ ФИГУРЫ ВЫПУСКА ОТБИТОЙ РУДЫ, СКЛОННОЙ К СМЕРЗАНИЮ

Научная статья

Петров Д.Н.^{1*}, Зубков В.П.²¹ ORCID : 0000-0002-5513-1871;^{1,2} Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (petrovdn74[at]mail.ru)

Аннотация

При освоении рудных месторождений криолитозоны подземным способом, для обеспечения эффективной добычи необходимо учитывать влияние отрицательных температур на все процессы подземных горных работ. При применении систем разработки с обрушением налегающих пород и выпуском отбитой руды ее смерзание в очистном пространстве приводит к аварийным остановкам процесса очистной выемки и значительному росту потерь. Экспериментальными исследованиями влияния влажности отбитой руды, склонной к смерзанию, на параметры фигуры ее выпуска из блока определены критическая высота, размеры эллипсоида выпуска и воронки внедрения. При выпуске руды в условиях отрицательной температуры очистного пространства установлено, что без увлажнения критическая высота выпуска составляла $h_{кр} = 0,95H_z$, а при влажности 1 % – $h_{кр} = H_z$. Максимальный горизонтальный диаметр эллипсоида выпуска в первом случае был равен половине высоты подэтажа, а при увеличении влажности рудной массы до 1% сократился до $0,35H_z$, при этом эллипсоид выпуска принял вытянутую форму с сужением в горизонтальной плоскости, что привело к снижению его максимального диаметра на 25%. Параметры воронки внедрения при этом различались не существенно. Изменение формы эллипсоида выпуска объясняет механизм возрастания потерь выпускаемой рудной массы при ее увлажнении в условиях отрицательных температур очистного пространства при подземной разработке месторождений криолитозоны системами с обрушением и выпуском руды. Полученные данные будут использованы при разработке рекомендаций по безопасному и эффективному выпуску руды при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны.

Ключевые слова: подземная разработка, рудные месторождения, криолитозона, этажное и подэтажное обрушение, выпуск руды, моделирование, эллипсоид выпуска, воронка внедрения.

INFLUENCE OF HUMIDITY AND TEMPERATURE ON THE PARAMETERS OF THE DUMPED ORE LOADING SHAPE PRONE TO FREEZE-UP

Research article

Petrov D.N.^{1*}, Zubkov V.P.²¹ ORCID : 0000-0002-5513-1871;^{1,2} Chersky Mining Institute of the North, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (petrovdn74[at]mail.ru)

Abstract

When developing cryolithozone ore deposits by underground mining method, it is necessary to take into account the effect of negative temperatures on all underground mining processes to ensure efficient mining. When using mining systems with collapse of overlying rocks and drawing of dumped ore, its freeze-up in the cleaning space leads to emergency stops in the process of cleaning excavation and a significant increase in losses. The critical height, dimensions of the drawing ellipsoid and the introduction funnel were determined by experimental studies of the influence of moisture content of the broken ore prone to freezing on the parameters of its release figure from the block. At ore drawing in conditions of negative temperature of the cleaning space it was established that without humidification the critical height of release was $h_{kr} = 0,95H_e$, and at humidity of 1% - $h_{kr} = H_e$. The maximum horizontal diameter of the outlet ellipsoid in the first case was equal to half the height of the sub-storey, and when the moisture content of the ore mass increased to 1%, it decreased to $0.35H_e$, while the outlet ellipsoid took an elongated shape with a narrowing in the horizontal plane, which led to a decrease in its maximum diameter by 25%. The parameters of the injection funnel did not differ significantly. The change in the shape of the drawing ellipsoid explains the mechanism of increasing losses of the released ore mass when it is moistened under the conditions of negative temperatures of the cleaning space in the underground development of cryolithozone deposits by systems with collapse and ore release. The obtained data will be used in the development of recommendations for safe and efficient ore drawing during the underground development of cryolithozone ore deposits.

Keywords: underground development, ore deposits, cryolithozone, storey and sub-storey collapse, ore drawing, modelling, drawing ellipsoid, introduction funnel.

Введение

Системы разработки этажного и подэтажного обрушения с выпуском руды под обрушенными налегающими породами, характеризующиеся высокой производительностью и низкими затратами на управление горным давлением, получили широкое распространение при подземной разработке руд цветных и благородных металлов в мировой и отечественной практике [1], [2], [3]. В нашей стране данная технология считается наиболее востребованной при освоении месторождений бедных руд с большим объемом добычи [4].

Однако, в условиях Северо-Востока России, с учетом неразвитой инфраструктуры и повышенных затрат на доставку материалов и оборудования, область их эффективного применения расширяется. Несомненным преимуществом рассматриваемой технологии является возможность оперативно реагировать на изменения условий залегания рудных тел без необходимости завоза дополнительных объемов материалов и оборудования. Наиболее перспективными для применения различных вариантов указанного класса систем являются комплексные, например золото-сурьмяные, и полиметаллические рудные месторождения [5].

Одним из главных недостатков этой технологии считаются относительно высокие показатели потерь и разубоживания. Основной причиной этого, чаще всего, является выбор параметров системы разработки, режима и организации работ, не соответствующих условиям залегания рудных тел и содержанию полезного ископаемого.

Как показывает анализ научно-технической литературы, повышение эффективности применения систем с обрушением и выпуском руды достигается путем оптимизации размеров очистных выработок, параметров отбиваемых слоев, управлением грансоставом выпускаемой руды, выбором режима и производительности выпуска [6], [7], [8], [9]. Для этого необходимо проведение исследований, позволяющих понять механизм поведения рудной массы при ее выпуске.

Методы и принципы исследования

В отечественной практике, для расчета показателей извлечения руды и конструктивных параметров систем разработки с обрушением и выпуском руды используются методики расчета, основанные на теоретических положениях, разработанных В. В. Куликовым, Г. М. Малаховым и Н. Г. Дубыниным [10], [11], [12]. Основными элементами данных методик являются параметры эллипсоида вращения, воронки внедрения и критическая высота выпуска. Параметры фигуры выпуска определяются путем физического моделирования процесса выпуска с учетом конкретных условий подземной разработки месторождений.

Однако влияние смерзания руды при ее выпуске из очистного блока в условиях подземной разработки рудных месторождений криолитозоны на форму и размеры зоны потока изучены слабо [13], [14].

Для определения влияния изменения влажности отбитой руды при отрицательном температурном режиме очистного пространства на форму и размеры эллипсоида выпуска, воронки внедрения и критическую высоту выпуска были проведены исследования методом физического моделирования.

При проведении экспериментальных исследований были приняты условия и масштабы подобию, порядок подготовки и проведения экспериментов, рассчитанные и использованные ранее, при физическом моделировании процесса донного выпуска руды [15]. Выпуски производились на стенде с траншейной конструкцией днища, также использовавшимся при ранее проведенных исследованиях [16].

Подготовка материала к эксперименту, заполнение стенда и экспериментальные выпуски руды под обрушенными породами проводились в специальной криокамере, оснащенной сплит-системой «Polaris», позволяющей воспроизвести отрицательный температурный режим рудничного воздуха и массива многолетнемерзлых горных пород при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны.

Определение размеров эллипсоида выпуска и его критической высоты производилось с использованием специальных маркеров, размещаемых в слое выпускаемой руды. Маркеры были изготовлены из кусков материала, используемого в качестве отбитой руды (мраморной крошки) грансоставом 4 – 5 мм. Это позволило сохранить равенство углов внутреннего трения материала натуре и модели. Для облегчения их визуального обнаружения в материале модели, маркеры были окрашены краской разного цвета (синий, красный и зеленый). На каждом маркере была нанесена цифра, соответствующая его положению в горизонтальной плоскости стенда.

Материал руды и породы, стенд и используемые для формирования инструменты выдерживались в криокамере до набора устойчивой температуры -5°C . Температура мраморной крошки и дробленого железистого кварцита, используемых в качестве отбитой руды и обрушенной породы при формировании стенда, измерялась с помощью тепловизора FLIR SC660 и мультитермометра «Digital». После проведения контрольных замеров приступали к заполнению стенда. Порядок размещения материала в стенде был аналогичен предыдущему этапу исследований.

При загрузке стенда первая группа маркеров красного цвета размещались в отбитой руде на высоте 10 см от днища стенда одним слоем. Схема расположения маркеров в горизонтальной плоскости приведена на рисунке 1.

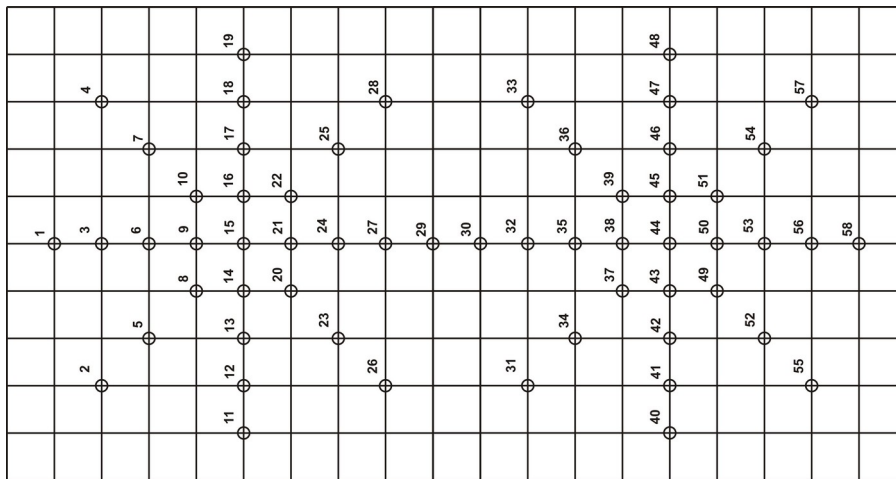


Рисунок 1 - Схема расположения маркеров в слое

Следующая группа маркеров, зеленого цвета, располагалась по аналогичной схеме слоем на высоте 25 см от днища блока. Последняя группа маркеров, синего цвета, размещалась на границе руда-порода, на высоте 40 см (рисунок 2).



Рисунок 2 - Фото размещения маркеров в слое

После размещения слоя руды с маркерами высотой, в стенд загружался дробленый железистый кварцит до полного заполнения. Затем стенд выдерживался в неподвижном состоянии в течение 9 минут, что в масштабе времени соответствует стандартному времени проветривания после массового взрыва на производстве (межсменный перерыв 1 час).

Выпуск материала из стенда начинали после контрольного замера температуры воздуха в криокамере и стенках стенда. Выпуск руды осуществлялся в равномерно-последовательном режиме, дозами величиной 100 гр.

Выпущенная руда взвешивалась, затем, способом магнитной сепарации производилось отделение из рудного материала пустой породы (железистый кварцит), и ее взвешивание. Из оставшейся руды извлекались маркеры. Все результаты фиксировались в журнале испытаний.

Выпуск руды из блока производился до достижения разубоживания в дозе выпуска 80%, затем производилась обработка результатов.

По полученным данным, для каждого эксперимента, графоаналитическим методом выполнялось построение эллипсоида выпуска, определялись его основные размеры и критическая высота выпуска.

Определение параметров воронки внедрения проводилось в результате отдельных экспериментов. Материалы и оборудование, условия подготовки и проведения эксперимента были аналогичны вышеприведенным.

Подготовленный к выпуску стенд также выдерживался в криокамере требуемое количество времени. Затем выполнялся выпуск руды до появления разубоживания в дозе выпуска. После этого выпуск останавливался, и производилось извлечение материала, имитирующего породу, через верхнюю, открытую поверхность стенда.

Выемка породы выполнялась слоями 10 см до достижения границы руда-порода, после этого выполнялся замеры высоты и размеров верхней границы воронки внедрения. Далее производилась выемка руды и породы из стенда слоями 5 см, и определялись размеры поперечного сечения воронки внедрения. Полученные данные фиксировались в журнале проведения эксперимента.

По данным каждого эксперимента выполнялось графическое построение воронки внедрения, определялись ее основные размеры и положение в пространстве стенда.

Основные результаты

Обработка результатов экспериментов позволила определить основные размеры и пропорции эллипсоида выпуска, воронки внедрения и определить критическую высоту выпуска отбитой руды, склонной к смерзанию, при площадном выпуске в зависимости от ее влажности, в условиях отрицательного температурного режима очистного пространства (рисунок 3).

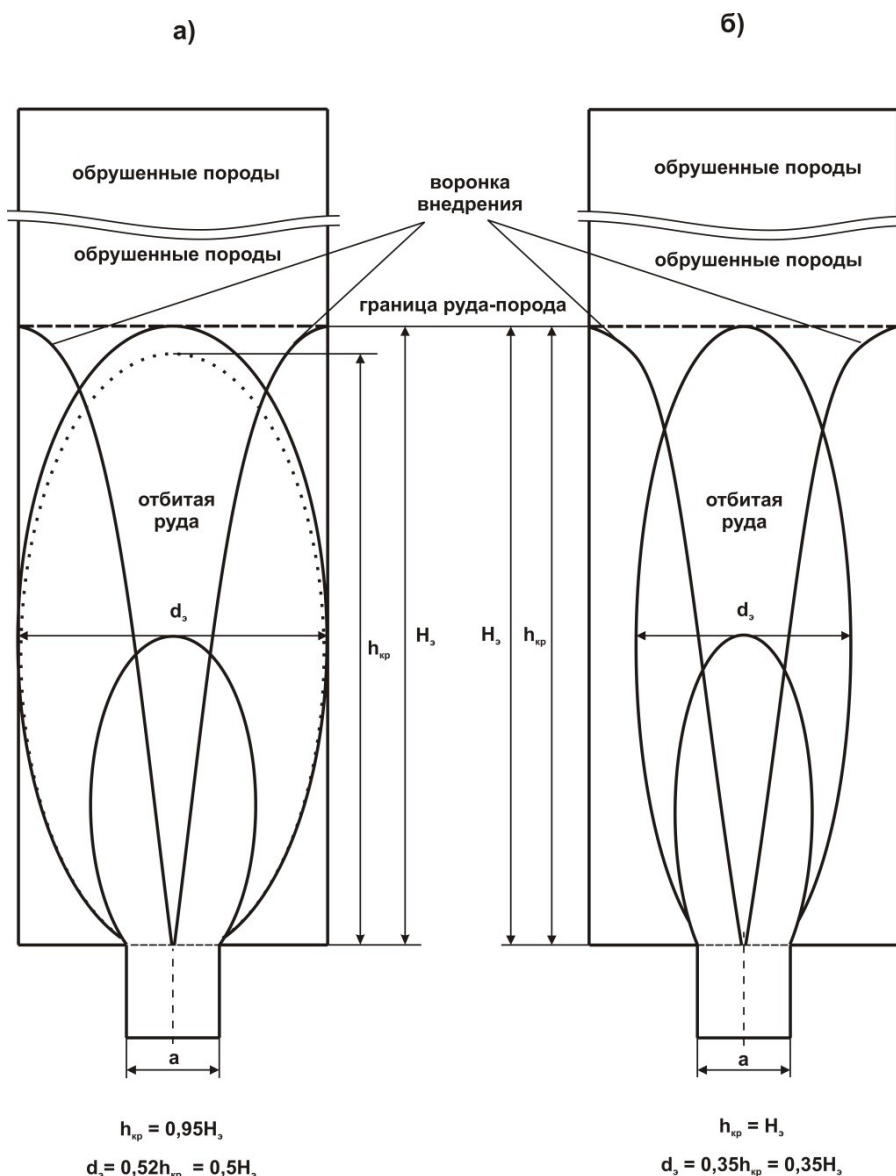


Рисунок 3 - Результаты определения параметров фигуры выпуска отбитой руды из блока на физической модели при температуре -5°C

Примечание: а) при выпуске без увлажнения отбитой руды; б) при увлажнении рудной массы на 1 %

Обсуждение

Несомненно, установленные данные справедливы только для условий конкретного эксперимента и не могут быть напрямую использованы при проектировании параметров технологии на конкретных месторождениях. Однако проведенные исследования объясняют причину снижения показателей извлечения руды, склонной к смерзанию, при ее выпуске из блока и увеличении влажности рудной массы на 1% – это образование на периферии потока выпускаемой руды смерзшихся участков, которое приводит к существенному уменьшению ширины зоны потока выпускаемой руды (горизонтального диаметра эллипсоида), и соответственно, к росту ее потерь при выпуске.

Заключение

Установленные закономерности изменения параметров фигуры выпуска руды в условиях отрицательных температур очистного пространства в зависимости от увеличения влажности позволяют объяснить механизм возрастания потерь от ее смерзания. Установленные зависимости получены впервые, и будут учтены при разработке рекомендаций по обеспечению безопасного и эффективного выпуска руды при подземной разработке рудных месторождений криолитозоны.

Финансирование

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.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам, принимавшим участие в проведении экспериментов и рецензентам за объективную оценку работы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

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.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the colleagues who participated in the experiments and to the reviewers for their objective evaluation of the work.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Балек А. Е. Совершенствование подземной разработки Соколовского месторождения системами с обрушением в условиях обводненных налегающих пород / А. Е. Балек, А. Д. Сашурин, Т. Ф. Харисов // Проблемы недропользования. — 2019. — № 1. — С. 5–13. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.005
2. Козырев С. А. Совершенствование технологии взрывной отбойки в системе разработки с поэтажным обрушением и торцовым выпуском руды на подземных рудниках Хибинских месторождений / С. А. Козырев, А. Ю. Абраштитов, В. С. Онуприенко [и др.] // Горный журнал. — 2019. — № 10. — С. 67–72. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.12
3. Gómez R. Comparison of normalized and non-normalized block caving comminution models / R. Gómez, R. Castro, F. Betancourt [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2021. — Vol. 121. — № 11. — P. 581–588. DOI: 10.17159/2411-9717/1150/2021
4. Смирнов А. А. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами / А. А. Смирнов, К. В. Барановский // Проблемы недропользования. — 2022. — № 2. — С. 136–145. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.136
5. Зубков В. П. Влияние влажности отбитой руды на потери в зависимости от времени ее нахождения в блоке до выпуска при разработке месторождений криолитозоны / В. П. Зубков, Д. Н. Петров, Г. П. Необутов // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 5. — С. 71–75. — URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36757> (дата обращения: 22.04.2024).
6. Yu K. Optimum sublevel height and drift spacing in sublevel cave mining based on random medium theory / K. Yu, F. Ren, G. Chitombo [et al.] // Mining, Metallurgy & Exploration: An Official International Peer-reviewed Journal of the Society. — 2020. — № 37(2). — P. 681–690.
7. Nyarela M. S. Drawpoint loading optimization strategies in block caving: A case study of Palabora Mining Company / M. S. Nyarela, R. B. Khumalo, R. C. Nemathithi [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2022. — Vol. 122. — № 11. — P. 639–646.
8. Manzoor S. Rock fragmentation variations with increasing extraction ratio in sublevel caving: a case study / S. Manzoor, A. Gustafson, D. Johansson [et al.] // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. — 2022. — Vol. 36. — № 3. — P. 159–173. — DOI: 10.1080/17480930.2021.2000826
9. Соколов И. В. Рациональная конструкция траншейного днища для выпуска руды при отработке переходной зоны подземного рудника «Удачный» / И. В. Соколов, А. А. Смирнов, Ю. Г. Антипин [и др.] // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
10. Куликов В. В. Выпуск руды / В. В. Куликов. — Москва : Недра, 1980. — 303 с.
11. Малахов Г. М. Теория и практика выпуска руды / Г. М. Малахов, Р. В. Безух, П. Д. Петренко [и др.]. — Москва : Недра, 1968. — 311 с.

12. Дубынин Н. Г. Выпуск руды при подземной разработке / Н. Г. Дубынин. — Москва : Недра, 1965.
13. Хохолов Ю. А. Влияние депрессии рудничной вентиляции на накопление льда в очистном блоке с отбитой мерзлой рудой / Ю. А. Хохолов, М. В. Каймонов, А. С. Курилко [и др.] // ГИАБ. — 2012. — № 11. — С. 405–408.
14. Курилко А. С. К вопросу вторичного смерзания минерального сырья в процессе его добычи на рудниках Севера / А. С. Курилко, М. В. Каймонов [и др.] // ГИАБ. Отдельный выпуск. Якутия-3. — 2005. — С. 290–297.
15. Зубков В. П. Влияние режима выпуска руды на потери от смерзания при подземной разработке месторождений криолитозоны / В. П. Зубков, Д. Н. Петров [и др.] // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 90–94. — DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-00-00
16. Петров Д. Н. 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 [и др.] // Горная промышленность. — 2023. — № 2. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-00-00

Список литературы на английском языке / References in English

1. Balek A. E. Sovershenstvovanie podzemnoj razrabotki Sokolovskogo mestorozhdenija sistemami s obrusheniem v usloviyah obvodnennyh nalegajushhih porod [Improvement of underground development of the Sokolovskoye deposit using caving systems in the conditions of water-saturated overlying rocks] / A. E. Balek, A. D. Sashurin, T. F. Kharisov // Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsoil Use]. — 2019. — № 1. — P. 5–13. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.01.005 [in Russian]
2. Kozirev S. A. Sovershenstvovanie tekhnologii vzryvnoj otbojki v sisteme razrabotki s podehtazhnyim obrusheniem i torcovym vypuskom rudy na podzemnykh rudnikakh Khibinskikh mestorozhdenij [Improvement of blasting technology in the system of development with sublevel caving and stope ore release at underground mines of the Khibiny deposits] / S. A. Kozirev, A. Yu. Abrashitov, V. S. Onuprienko [et al.] // Gornyj zhurnal [Mining Journal]. — 2019. — № 10. — P. 67–72. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.12 [in Russian]
3. Gómez R. Comparison of normalized and non-normalized block caving comminution models / R. Gómez, R. Castro, F. Betancourt [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2021. — Vol. 121. — № 11. — P. 581–588. DOI: 10.17159/2411-9717/1150/2021
4. Smirnov A. A. Kriticheskij analiz teoreticheskikh polozhenij po vypusku rudy pod obrushennymi porodami [Critical analysis of theoretical positions on ore release under caved rock masses] / A. A. Smirnov, K. V. Baranovsky // Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsoil Use]. — 2022. — № 2. — P. 136–145. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.136 [in Russian]
5. Zubkov V. P. Vlijanie vlazhnosti otbitoj rudy na poteri v zavisimosti ot vremeni ee nahozhdenija v bloke do vypuska pri razrabotke mestorozhdenij kriolitozony [Influence of broken ore moisture on losses depending on the time it stays in the block before release during the development of cryolithozone deposits] / V. P. Zubkov, D. N. Petrov, G. P. Neobutov // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Achievements of Modern Natural Science]. — 2018. — № 5. — P. 71–75. — URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?Id=36757> (accessed: 22.04.2024). [in Russian]
6. Yu K. Optimum sublevel height and drift spacing in sublevel cave mining based on random medium theory / K. Yu, F. Ren, G. Chitombo [et al.] // Mining, Metallurgy & Exploration: An Official International Peer-reviewed Journal of the Society. — 2020. — № 37(2). — P. 681–690.
7. Nyarela M. S. Drawpoint loading optimization strategies in block caving: A case study of Palabora Mining Company / M. S. Nyarela, R. B. Khumalo, R. C. Nemathithi [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2022. — Vol. 122. — № 11. — P. 639–646.
8. Manzoor S. Rock fragmentation variations with increasing extraction ratio in sublevel caving: a case study / S. Manzoor, A. Gustafson, D. Johansson [et al.] // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. — 2022. — Vol. 36. — № 3. — P. 159–173. — DOI: 10.1080/17480930.2021.2000826
9. Sokolov I. V. Racional'naja konstrukcija transhejnogo dnishha dlja vypuska rudy pri otrabotke perehodnoj zony podzemnogo rudnika «Udachnyj» [Rational design of the trench bottom for ore release during the development of the transition zone of the underground mine "Udachny"] / I. V. Sokolov, A. A. Smirnov, Yu. G. Antipin [et al.] // FTPRPI. — 2013. — № 1. [in Russian]
10. Kulikov V. V. Vypusk rudy [Ore release] / V. V. Kulikov. — Moscow : Nedra, 1980. — 303 p. [in Russian]
11. Malakhov G. M. Teorija i praktika vypuska rudy [Theory and practice of ore release] / G. M. Malakhov, R. V. Bezukh, P. D. Petrenko [et al.]. — Moscow : Nedra, 1968. — 311 p. [in Russian]
12. Dubynin N. G. Vypusk rudy pri podzemnoj razrabotke [Ore release during underground mining] / N. G. Dubynin. — Moscow : Nedra, 1965. [in Russian]
13. Khokholov Yu. A. Vlijanie depressii rudnichnoj ventiljacii na nakoplenie l'da v ochistnom bloke s otbitoj merzloj rudoj [The influence of mine ventilation depression on ice accumulation in the ore block with frozen ore release] / Yu. A. Khokholov, M. V. Kaimonov, A. S. Kurilko [et al.] // GИAB. — 2012. — № 11. — P. 405–408. [in Russian]
14. Kurilko A. S. K voprosu vtorichnogo smerzaniya mineral'nogo syr'ja v processe ego dobychi na rudnikah Severa [On the secondary freezing of mineral raw materials during mining in the mines of the North] / A. S. Kurilko, M. V. Kaimonov [et al.] // GИAB. Otdel'nyj vypusk. Jakutija-3 [GИAB. Separate issue. Yakutia-3]. — 2005. — P. 290–297. [in Russian]
15. Zubkov V. P. Vlijanie rezhima vypuska rudy na poteri ot smerzaniya pri podzemnoj razrabotke mestorozhdenij kriolitozony [The influence of ore release regime on freezing losses during the underground development of cryolithozone deposits] / V. P. Zubkov, D. N. Petrov [et al.] // Gornaya promyshlennost' [Mining Industry']. — 2022. — № 2. — P. 90–94. — DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-00-00 [in Russian]
16. Petrov D. N. Vlijanie konstruktivnogo oformlenija dnishha bloka na poteri ot smerzaniya otbitoj rudy pri donnom vypuske v usloviyah otricatel'nyh temperatur ochistnogo prostranstva [The influence of the block bottom design on freezing losses of broken ore during bottom release in negative temperatures of the clearing space] / D. N. Petrov, V. P. Zubkov [et al.] // Gornaya promyshlennost' [Mining Industry']. — 2023. — № 2. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-2-00-00 [in Russian]