



ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДНИЩА БЛОКА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ ПОЛОГИХ ЗАЛЕЖЕЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Актуальность работы. В настоящее время для отработки запасов вкрапленных медно-никелевых руд, представленных пологими залежами преимущественно средней мощности, применяется система этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды. Данной технологии присущи весьма высокие потери и разубоживание руды (25-30% и более). Для повышения полноты и качества выемки запасов предложена комбинированная система разработки, сочетающая этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды. Ее эффективность в значительной степени обусловлена конструкцией днища блока, определяющей количество горизонтов и основные параметры выпуска руды. **Цель работы.** Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки, обеспечивающей полноту и качество выемки запасов при минимизации затрат на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку. **Используемые методы.** Использован комплексный метод исследований, включающий анализ практики и условий применения комбинированной системы разработки, конструирование, экономико-математическое моделирование и сравнительный анализ. **Результаты.** Рассмотрены три варианта конструкции днища блока: траншейное, плоское и комбинированное. Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с комбинированным днищем имеет наименьшие потери руды (3-12%) при относительно небольшом разубоживании (13-20%), а вариант с плоским днищем – наибольшие потери (33-35%) при минимальном разубоживании (1,2-3,5%). При этом эксплуатационные затраты на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку по варианту с комбинированным днищем на 4-10% ниже, чем по варианту с траншейным днищем. **Выводы.** Установлено, что вариант с комбинированным днищем (камера с плоским днищем и междукамерный целик с траншейным днищем) обеспечивает наилучшие показатели извлечения при минимальных затратах на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку.

Ключевые слова: пологое месторождение, комбинированная система разработки, камера, междукамерный целик, конструкция днища, потери, разубоживание, эксплуатационные затраты, прибыль

Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1.

© Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2024

Для цитирования

Обоснование рациональной конструкции днища блока при комбинированной системе разработки пологих залежей средней мощности / Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №3. С. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SUBSTANTIATION OF A RATIONAL BLOCK BOTTOM STRUCTURE AT A COMBINED MINING SYSTEM OF SHALLOW DEPOSITS OF MEDIUM CAPACITY

Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M.

Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Relevance. The block caving system with frontal ore drawing is used to mine the reserves of interspersed copper-nickel ores represented by shallow deposits of mainly medium capacity. This technology is characterized by very high losses and dilution of ore (25-30% or more). To improve completeness and the quality of extraction of reserves, the authors proposed a combined mining system, including a chamber system and a block caving system with frontal ore drawing. Its efficiency is largely conditioned by a block bottom structure, which determines the number of horizons and the main parameters of ore drawing. **Objectives.** The research is aimed at providing a substantiation of the rational block bottom structure at a combined mining system that ensures completeness and the quality of excavation of reserves, while minimizing the costs for development and face-entry drivage and stoping. **Methods Applied.** The authors used a comprehensive research method, including an analysis of the practice and application conditions of the combined mining system, design, economic and mathematical modeling and a comparative analysis. **Results.** The paper describes three options of the block bottom structure: trench, flat and combined structures. It has been found that in a total range of capacity from 10 to 25 m, the option with the combined bottom has the lowest ore losses (3-12%) at a relatively low dilution (13-20%), and the option with the flat bottom has the greatest losses (33-35%) at a minimum dilution (1.2-3.5%). At the same time, the operating costs for development and face-entry drivage and stoping in the option with the combined bottom are 4-10% lower than in the option with a trench bottom. **Conclusions.** It has been found that the option with a combined bottom (the chamber with a flat bottom and a safety pillar with a trench bottom) provides the best ore extraction indicators at minimum costs for development and face-entry drivage and stoping.

Keywords: shallow deposit, combined mining system, chamber, safety pillar, bottom structure, losses, dilution, operating costs, profit

The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00412-22 PR. Subject 1 (2022-2024). Methodological foundations of the strategy for the mining of mineral deposits in the dynamics of the development of mining systems (FUWE-2022-0005), reg. №1021062010531-8-1.5.1

For citation

Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Substantiation of a Rational Block Bottom Structure at a Combined Mining System of Shallow Deposits of Medium Capacity. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 3, pp. 5-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-5-12>

Введение

Воспроизводство и развитие минерально-сырьевой базы ГМК «Норильский никель» в условиях неуклонного истощения запасов богатых сплошных медно-никелевых руд тесно связано с решениями о вовлечении в эксплуатацию запасов бедных вкрапленных руд [1]. Основные месторождения вкрапленных медно-никелевых руд Норильского горнопромышленного района (Норильск-1, Масловское, Черногорское и др.) представлены пологими залежами (до 15°) преимущественно средней мощности (от 10 до 25 м) при крепких и устойчивых налегающих породах.

В настоящее время для подземной добычи вкрапленных медно-никелевых руд применяется система этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды и использованием самоходного оборудования [2, 3]. Обладая достоинствами в виде высокой производительности труда и низкой себестоимости

добычных работ, данная система разработки характеризуется высоким удельным объемом подготовительно-нарезных работ (ПНР) и весьма низкими показателями извлечения запасов – потери и разубоживание руды составляют 25-30% и более, что не отвечает основному требованию рационального использования и охраны недр, заключающемуся в обеспечении наиболее полного и комплексного извлечения полезных ископаемых из недр [4, 5].

Состояние вопроса и постановка задачи

Наиболее перспективным решением проблемы повышения полноты и качества выемки запасов пологих залежей представляется применение комбинированной системы разработки (КСР). Сущность КСР состоит в использовании преимуществ и минимизации недостатков систем разработки различных классов при их сочетании в одном добычном блоке, что

обеспечивает наилучшую адаптацию к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям. В мировой практике имеется достаточно примеров использования КСР на подземных рудниках [6-8].

Обоснованию эффективных вариантов КСР и их параметров применительно к условиям пологих залежей медно-никелевых руд посвящены исследования ИНКОН РАН [9], ИГД СО РАН [10-14] и ИГД УрО РАН [15]. В основе большинства вариантов КСР лежит система с твердеющей закладкой. Высокие затраты на закладочные работы существенно снижают эффективность КСР. Практика показала, что в условиях бедных руд наиболее эффективна комбинация системы с открытым очистным пространством и системы с обрушением.

В работе [12] предложен вариант КСР, сочетающий камерно-столбовую систему и систему с обрушением. На границах блока по кровле и почве залежи проходятся вентиляционно-доставочные выработки, между которыми камерно-столбовой выемкой формируется верхняя и нижняя подсечки. Образованная между ними рудная консоль и налегающие породы поддерживаются временными столбчатыми целиками. Отбойка рудной консоли ведется под предварительно обрушенными налегающими породами. Основным достоинством варианта является возможность селективной выемки запасов руды в почве, кровле и центральной части залежи, различающихся по вещественному составу, обогатимости и ценности. Область его применения – мощные (от 20 до 30 м) пологие залежи.

В работе [13] предложен вариант КСР, сочетающий этажно-камерную систему и систему с обрушением. Вариант предусматривает отработку камер увеличенной ширины под защитой породной консоли с последующим обрушением временных междукамерных целиков (МКЦ). Погашение МКЦ ведется с отставанием от фронта камерной выемки на длину устойчивого зависания консоли совместно с обрушением пород кровли. Обязательным условием погашения МКЦ, исключающим заброс руды в выработанное пространство, является заполнение его налегающими породами на высоту не менее мощности залежи. Вариант реализуется при полевой или рудной подготовке горизонта выпуска руды. Наилучшие показатели извлечения достигаются при полевой траншейной подготовке днища блока (потери – 10-14%, разубоживание – 14-17%) [14]. Область применения варианта – мощные (от 20 до 40 м) пологие залежи.

Авторами разработан вариант КСР, сочетающий этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды, позволяющий интенсифицировать процесс очистной выемки и повысить полноту извлечения запасов [15]. Вариант предусматривает выемку камер увеличенной ширины с последующим принудительным обрушением налегающих пород и отработкой МКЦ технологией этажного обрушения с послойной отбойкой и торцовым выпуском руды. Целесообразно расположение камер и МКЦ длинной стороной по простиранию залежи, что позволяет уменьшить

длину буро-доставочных выработок и повысить эффективность работы погрузо-доставочных машин (ПДМ) на выпуске и доставке руды. Безопасность очистных работ обеспечивается применением ПДМ с дистанционным управлением. Область применения варианта – пологие залежи средней мощности (от 10 до 25 м).

Эффективность КСР обусловлена не только оптимальным соотношением запасов в камерах и целиках [16], но и конструкцией днища блока, определяющей количество горизонтов и основные параметры выпуска руды. Обоснование рациональной конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности, обеспечивающей полноту и качество выемки запасов при минимизации затрат на ПНР и очистную выемку, является актуальной научно-технической задачей.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрены три возможные конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности: траншейное, плоское и комбинированное (рис. 1). Траншейное днище блока предполагает полевую подготовку горизонта выпуска и доставки руды. Траншеи для выпуска руды из камеры и МКЦ оформляются в подстилающих породах. Для повышения устойчивости выработок выпуска и снижения эксплуатационных затрат на ПНР предусматривается разноразное расположение траншейного штрека камеры и буро-доставочного штрека МКЦ. Углы откосов выпускной траншеи камеры и МКЦ приняты равными соответственно 47 и 65° [17]. Также предусматривается раздельная выемка породы выпускной траншеи и камерных запасов, что позволяет несколько улучшить показатели извлечения руды из камеры [4].

При плоском днище блока все выработки горизонта выпуска и доставки проходятся по руде, что существенно снижает эксплуатационные затраты на ПНР и очистную выемку, а также разубоживание руды при отработке МКЦ. При этом образуются значительные потери отбитой руды на днище МКЦ при выпуске руды под обрушенными породами [18].

Для реализации комбинированного днища блока требуется два горизонта выпуска и доставки руды – рудный горизонт для выемки камер и полевой горизонт для отработки целиков, что увеличивает объем ПНР. При этом увеличивается расстояние между выпускными выработками камеры и МКЦ, что повышает их устойчивость и безопасность очистных работ. А самое главное, обеспечиваются более высокие показатели извлечения руды в целом по блоку за счет выемки камеры и МКЦ в условиях, наиболее благоприятных для выпуска руды.

Выбор рациональной конструкции днища блока при КСР пологих залежей средней мощности осуществляется по критерию максимальной прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов с учетом показателей извлечения руды и эксплуатационных затрат на ПНР и очистную выемку [19, 20].

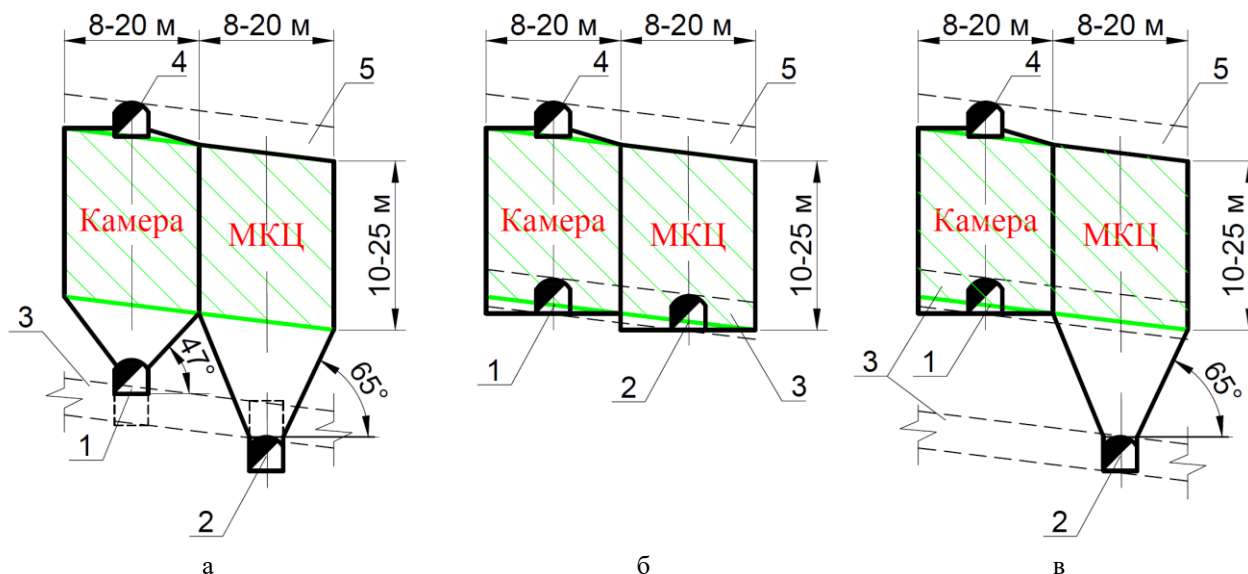


Рис. 1. Конструкция дна блока при КСР пологих залежей средней мощности: а – траншейное днище; б – плоское днище; в – комбинированное днище; 1 – траншейный штрек; 2 – буро-доставочный штрек; 3 – доставочный орт; 4 – буро-вентиляционный штрек; 5 – вентиляционно-буровой орт
 Fig. 1. The block bottom structure at the combined mining system of shallow deposits of medium capacity: а is a trench bottom; б is a flat bottom; в is a combined bottom; 1 is a trench entry; 2 is a drilling and delivery entry; 3 is a delivery ort; 4 is a drilling and ventilation entry; 5 is a ventilation and drilling ort

На основе экономико-математического моделирования определены потери и разубоживание руды в зависимости от мощности залежи, изменяющейся в интервале от 10 до 25 м, при условии равенства запасов камеры и МКЦ (рис. 2). Геомеханически обоснованные параметры камеры и МКЦ: длина – 76 м; ширина – 8-20 м (в зависимости от мощности залежи); ширина – 10-25 м (равна мощности залежи).

Методика определения потерь и разубоживания руды при КСР учитывает схему подготовки и нарезки запасов блока, особенности технологии очистной выемки и параметры конструктивных элементов КСР и включает следующие возможные источники потерь и разубоживания:

- при отработке камер: потери неотбитой руды и разубоживание пустыми породами при оформлении кровли камеры; потери отбитой руды в днище или на почве камеры и разубоживание от отслоения налегающих пород; разубоживание при формировании траншейного днища камеры;

- при отработке МКЦ: потери и разубоживание при выпуске руды под обрушенными породами с учетом параметров активного сечения при торцовом выпуске и коэффициента разрыхления рудной массы [17].

Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с комбинированным днищем имеет наименьшие потери руды (от 2,5 до 12%), а вариант с плоским днищем – наибольшие (от 33,5 до 35%). При этом вариант с плоским днищем имеет наименьшее разубоживание (от 1,2 до 3,5%), а вариант с траншейным днищем – наибольшее

(от 15 до 21%). Минимальные потери достигаются применением ПДМ с ДУ, в том числе на зачистке почвы камеры, и увеличением угла откосов выпускной траншеи МКЦ до 65°, что наиболее близко к углу истечения рудной массы. Учитывая уровень потерь, извлекаемая ценность добываемой руды по варианту с комбинированным днищем на 30-40% выше, чем по варианту с плоским днищем.

Далее определены эксплуатационные затраты на ПНР и очистную выемку (включая отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород) в зависимости от мощности залежи (рис. 3). При моделировании учтены следующие технологические решения, позволяющие повысить эффективность КСР:

- применение на выпуске и доставке руды более производительных, при этом более компактных, аккумуляторных ПДМ грузоподъемностью 18 т (вместо дизельных ПДМ грузоподъемностью 14 т), что позволяет повысить производительность процесса выпуска и доставки руды, уменьшить сечения выработок и удельный объем ПНР по блоку;

- использование при отбойке камерных запасов скважин уменьшенного диаметра (в диапазоне от 64 до 89 мм в зависимости от ширины МКЦ), что позволяет обеспечить качественное формирование и сохранность МКЦ и уменьшить выход негабарита в камере;

- принудительное обрушение налегающих пород осуществляется на открытое пространство, что позволяет существенно увеличить сетку скважин и снизить их удельный расход.

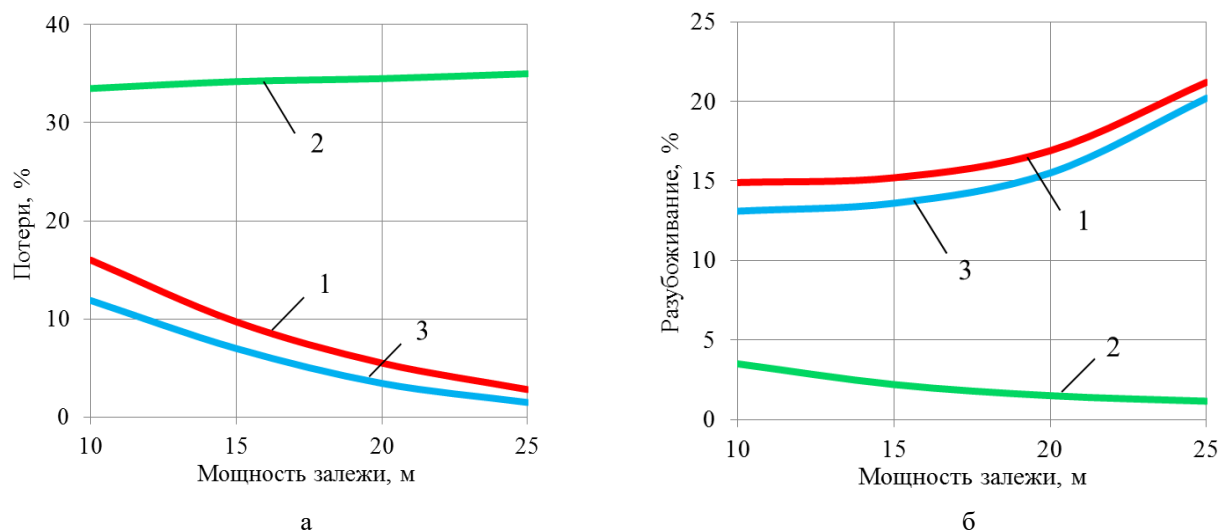


Рис. 2. Зависимости потерь (а) и разубоживания (б) от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное днище; 2 – плоское днище; 3 – комбинированное днище

Fig. 2. Dependences between losses (a) and dilution (б) and capacity of the deposit with different block bottom structures: 1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom

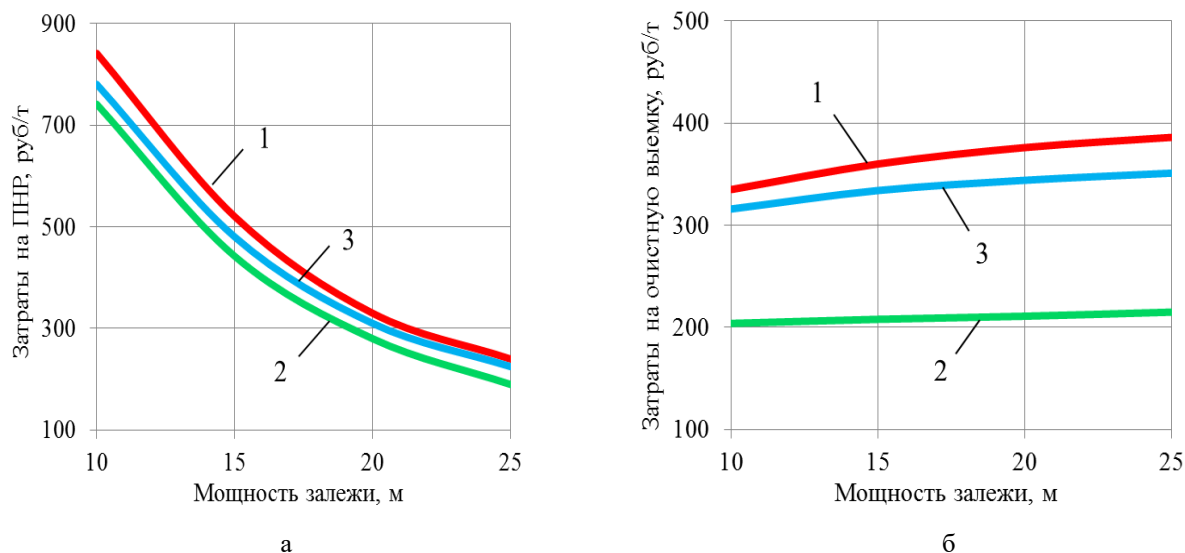


Рис. 3. Зависимости затрат на ПНР (а) и очистную выемку (б) от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное днище; 2 – плоское днище; 3 – комбинированное днище

Fig. 3. Dependences between development and face-entry drivage expenses (a) and stopping (b) and capacity of the deposit with different block bottom structures:

1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom

Установлено, что во всем диапазоне изменения мощности залежи от 10 до 25 м вариант с плоским днищем имеет наименьшие затраты на ПНР, а вариант с траншейным днищем – наибольшие. Разница небольшая и находится в пределах от 13 до 21%. Это объясняется меньшей длиной вертикальных выработок. Вместе с тем вариант с плоским днищем имеет наименьшие затраты на очистную выемку, а вариант с траншейным днищем – также наибольшие. Разница уже весьма существенная – от 64 до 78%. Это объясняется отсутствием затрат на формирование

породных выпускных траншей. Следует отметить, что затраты на ПНР и очистную выемку по варианту с комбинированным днищем соответственно на 4-8 и 6-10% ниже, чем по варианту с траншейным днищем.

Результаты итоговой оценки эффективности КСР с различной конструкцией днища блока в сравнении с традиционной системой этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды (при ширине очистной заходки 12,5 м и угле откосов выпускной траншеи 55°) по величине прибыли в зависимости от мощности залежи приведены на рис. 4.

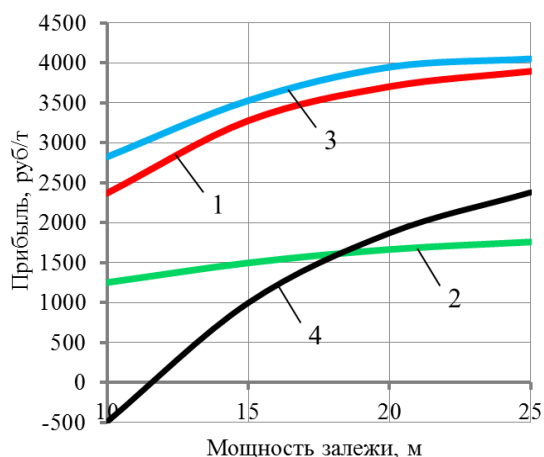


Рис. 4. Зависимость прибыли от мощности залежи при различной конструкции днища блока: 1 – траншейное; 2 – плоское; 3 – комбинированное; 4 – система этажного обрушения с торцовым выпуском руды

Fig. 4. Dependence between profit and capacity of the deposit with different block bottom structures: 1 is a trench bottom; 2 is a flat bottom; 3 is a combined bottom; 4 is a block caving system with frontal ore drawing

Установлено, что максимальную прибыль обеспечивает вариант с комбинированным днищем. Ее величина на 5-20% выше, чем по варианту с траншейным днищем, в 1,3-1,4 раза выше, чем по варианту с плоским днищем, и в 1,7-3,5 раза выше, чем при системе этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды. Эффект достигается путем повышения полноты (потери – 3-12%) и качества (разубоживание – 13-20%) извлечения комплексных руд при минимизации затрат на ПНР и очистную выемку за счет применения более производительных и компактных ПДМ, использования скважин уменьшенного диаметра при отбойке камерных запасов, увеличения сетки скважин при отбойке налегающих пород.

Заключение

Выполнены исследования по обоснованию рациональной конструкции днища блока при КСР, сочетающей этажно-камерную систему и систему этажного обрушения с торцовым выпуском руды, в условиях пологих залежей средней мощности. В результате исследований установлено, что рациональным является комбинированное днище блока (камера с плоским днищем и МКЦ с траншейным днищем), обеспечивающее наилучшие показатели извлечения при минимальных затратах на ПНР и очистную выемку.

Список источников

1. Лежнин А.А., Терновой В.В., Шамшев А.В. Развитие минерально-сырьевой базы ГМК «Норильский никель» в проектных разработках института Гипроникель // Горный журнал. 2010. №5. С. 74-77.

2. Малиновский Е.Г., Голованов А.И., Ахпашев Б.А. Исследования влияния гранулометрического состава отбитой рудной массы на показатели извлечения при системе этажного принудительного обрушения руды физическим моделированием // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. №3 (151). С. 41-53. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53
3. Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцовому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей / Е.Г. Малиновский, Б.А. Ахпашев, А.И. Голованов, А.М. Гильдеев // Известия вузов. Горный журнал. 2019. №7. С. 34-44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
4. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд / Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, И.В. Никитин, Ю.М. Солломеин // Горная промышленность. 2022. №S1. С. 46-52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
5. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия вузов. Горный журнал. 2020. №7. С. 5-20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
6. Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений / Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский, А.А. Рожков, М.В. Ключев // Проблемы недропользования. 2020. №3 (26). С. 5-22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005
7. Franco A., Vieira R., Bunting R. The Panasqueira mine at a glance // Tungsten. 2014, vol. 3, pp. 1-12.
8. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L. Pillar strength in underground stone mines in the United States // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2011, vol. 48, no. 1, pp. 42-50. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.003
9. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Овчаренко О.В. Перспективы развития геотехнологий подземной добычи руд на глубоких рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений // Горная промышленность. 2021. №5. С. 70-75. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75
10. Развитие ресурсосберегающих геотехнологий разработки мощных пологопадающих залежей полиметаллических руд в условиях Норильска / А.П. Тапсиев, А.М. Фрейдин, В.А. Усков, А.Н. Анушенков, П.А. Филиппов, А.А. Неверов, С.А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №5. С. 123-136.
11. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А. Геомеханическая оценка комбинированной системы разработки мощных пологих рудных залежей с закладкой и обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. №5. С. 114-124.

12. Обоснование параметров камерно-столбовой выемки с регулярным извлечением целиков и обрушением пород кровли в условиях больших глубин / А.А. Неверов, Д.П. Семенов, С.А. Неверов, А.М. Никольский, М.В. Тишков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. №1. С. 5-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13
13. Неверов А.А. Геомеханическое обоснование нового варианта камерной выемки пологих мощных залежей с выпуском руды из подконсольного пространства // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. №6. С. 99-109.
14. Обоснование конструкций днищ блоков при системах разработки с камерно-целиковым порядком выемки / А.М. Никольский, С.А. Неверов, А.А. Неверов, М.В. Тишков, Д.П. Семенов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №4. С. 36-44.
15. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, Р.В. Криницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. №5-1. С. 88-104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
16. Соколов И.В., Барановский К.В. Выбор эффективной технологии подземной разработки месторождения кварца // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. №2. С. 10-17.
17. Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С. Система поэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел // Проблемы недропользования. 2023. №4 (39). С. 6-15. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006
18. Савич И.Н., Мустафин В.И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и поэтажном торцевом выпуске руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №S1. С. 419-429.
19. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, Р.И. Соколов // Известия вузов. Горный журнал. 2012. №3. С. 4-11.
20. Balt K., Goosen R.L. MSAHP: An approach to mining method selection // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2020, vol. 120, no. 8, pp. 451-460. DOI: 10.17159/2411-9717/1072/2020
- granulometric composition of the broken ore mass on the extraction indicators with a system of forced block caving of ore. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2022;(3(151)):41-53. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53
3. Malinovsky E.G., Akhпасhev B.A., Golovanov A.I., Gildeev A.M. Comparing the results of physical modeling and full-scale experiment on ore face draw in the system of block caving for flat deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2019;(7):34-44. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44
4. Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Study on the influence of recovery indicators on efficiency of underground mining of deposits of low-grade complex ores. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2022;(S1):46-52. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52
5. Yakovlev V.L. Solid mineral deposits integrated development methodology for Russian mineral resource base development strategy. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2020;(7):5-20. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20
6. Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozhkov A.A., Klyuev M.V. Overview of combined underground mining systems. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2020;(3(26)):5-22. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005
7. Franco A., Vieira R., Bunting R. The Panasqueira mine at a glance. *Tungsten*. 2014;3:1-12.
8. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011;48(1):42-50. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.003
9. Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Ovcharenko O.V. Prospects for the development of underground ore mining geotechnologies at the Talnakh and Oktyabrskoe deep mines. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry]. 2021;(5):70-75. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75
10. Tapsiev A.P., Freidin A.M., Uskov V.A., Anushenkov A.N., Filippov P.A., Neverov A.A., Neverov S.A. Resource-saving geotechnologies for thick gently dipping complex ore deposits in the Norilsk region. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2014;(5):123-136. (In Russ.)
11. Freidin A.M., Neverov A.A., Neverov S.A. Geomechanical evaluation of a combined system for the development of thick flat ore deposits with backfilling and caving. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2016;(5):114-124. (In Russ.)

References

1. Lezhnin A.A., Ternovoi V.V., Shamshev A.V. Development of mineral-raw-material base of JSC "MMC "Norilsk Nickel" in new project design of Gipronickel Institute. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2010;(5):74-77. (In Russ.)
2. Malinovsky E.G., Golovanov A.I., Akhпасhev B.A. Physical modeling studies on the influence of the

12. Neverov A.A., Semenov D.P., Neverov S.A., Nikolsky A.M., Tishkov M.V. Substantiation of parameters of room-and-pillar mining with regular extraction of pillars and roof caving at great depth. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2018;(1):5-13. (In Russ.) DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-5-13
13. Neverov A.A. Geomechanical substantiation of modified room-work in flat thick deposits with ore drawing under overhang. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2012;(6):99-109. (In Russ.)
14. 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. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2018;(4):36-44. (In Russ.)
15. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V. Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of a shallow deposit of low-grade complex ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2021;(5-1):88-104. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88
16. Sokolov I.V., Baranovsky K.V. Choosing an efficient technique for underground mining of quartz. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(2):10-17. (In Russ.)
17. Smirnov A.A., Baranovsky K.V., Dyachkov P.S. A sublevel caving system with frontal ore drawing for excavating pillars of sloping ore deposits. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use]. 2023;(4(39)): 6-15. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006
18. Savich I.N., Mustafin V.I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel ore drawing. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2015;(S1):419-429. (In Russ.)
19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I. Influence of extraction indicators on efficiency of underground mining technology of ore deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal]. 2012;(3):4-11. (In Russ.)
20. Balt K., Goosen R.L. MSAHP: An approach to mining method selection. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020;120(8):451-460. DOI: 10.17159/2411-9717/1072/2020

Поступила 29.02.2024; принята к публикации 29.04.2024; опубликована 30.09.2024
Submitted 29/02/2024; revised 29/04/2024; published 30/09/2024

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, директор, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: direct@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7841-5319

Антипин Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: geotech@igduran.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Соломенн Юрий Михайлович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894

Igor V. Sokolov – DrSc (Eng.), Director, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: direct@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7841-5319

Yuri G. Antipin – PhD (Eng.), Head of the Underground Geotechnology Laboratory, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: geotech@igduran.ru. ORCID 0000-0002-3564-0310

Igor V. Nikitin – Researcher of the Underground Geotechnology Laboratory, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: opening-kp@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3593-4319

Yuri M. Solomein – Researcher of the Underground Geotechnology Laboratory, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. E-mail: yuriysolo@mail.ru. ORCID 0000-0002-8226-6894