

Методика определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при комбинированной системе разработки пологопадающих месторождений

Ю.Г. Антипин✉, А.А. Смирнов, И.В. Никитин, Ю.М. Соломеин

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ geotech@igduran.ru

Резюме: Специфической особенностью комбинированных систем разработки в условиях пологопадающих месторождений средней мощности является необходимость формирования траншеи для выпуска руды междукамерного целика в подстилающих породах. Объем породной выпускной траншеи является одним из основных факторов, влияющих на эффективность комбинированной системы разработки. Уменьшение угла откоса и высоты выпускной траншеи, с одной стороны, позволяет снизить эксплуатационные затраты на отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород, с другой стороны, приводит к ухудшению показателей извлечения руды. Определение оптимальных параметров выпускной траншеи в зависимости от ширины междукамерного целика является актуальной научно-технической задачей. Для её решения разработана методика оценки эффективности и определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи по критерию прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов, включающая установленные функциональные зависимости показателей извлечения руды и эксплуатационных затрат на основные технологические процессы добычи руды от мощности и угла падения залежи, ширины междукамерного целика, угла откоса и высоты выпускной траншеи. Установлено, что оптимальные угол откоса и высота выпускной траншеи при ширине междукамерного целика 8–18 м составляют 65° и 4,8–16,1 м, при ширине 18–20 м – 60° и 13,2–15,1 м соответственно.

Ключевые слова: пологая залежь, комбинированная система разработки, междукамерный целик, выпускная траншея, показатели извлечения, эксплуатационные затраты

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки №075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

Для цитирования: Антипин Ю.Г., Смирнов А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М. Методика определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при комбинированной системе разработки пологопадающих месторождений. Горная промышленность. 2024;(5S):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-116-121>

Methodology for determining the optimal parameters of a rock release trench in the combined mining system for gently dipping deposits

Yu.G. Antipin✉, A.A. Smirnov, I.V. Nikitin, Yu.M. Solomein

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ geotech@igduran.ru

Abstract: A specific feature of combined mining systems in conditions of flat deposits of medium thickness is the need to form an ore release trench from the interchamber pillar in the underlying rocks. The volume of the release trench is one of the main factors affecting the efficiency of the combined mining system. Reducing the slope angle and the height of the release trench, on the one hand, allows reducing operating costs for breaking, releasing and delivering ore, caving of overlying rocks, on the other hand, leads to deterioration in ore extraction indicators. Determining the optimal parameters of the release trench depending on the width of the interchamber pillar is an urgent scientific and technical task. To solve it, a methodology has been developed for assessing the efficiency and determining the optimal parameters of the rock release trench based on the profit criterion per 1 ton of the recovered balance reserves, including the established functional dependencies of ore extraction indicators and the operating costs for the main technological processes of ore mining on the thickness and the dip angle of the deposit, the width of the interchamber pillar, the slope angle and the height of the release trench. It has been established that the optimal slope angle and height of the release trench with an interchamber pillar width of 8–18 m are 65° and 4.8–16.1 m, with a width of 18–20 m – 60° and 13.2–15.1 m, respectively.

Keywords: flat deposit, combined mining system, interchamber pillar, release trench, extraction indicators, operating costs

Acknowledgments: The work was carried out under the state assignment of the RF Ministry of Science and Higher Education №075-00412-22 PR. Topic 1. FUWE-2022-0005.

For citation: Antipin Yu.G., Smirnov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M. Methodology for determining the optimal parameters of a rock release trench in the combined mining system for gently dipping deposits. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):116–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-116-121>

Введение

Современная методология комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых предусматривает компенсацию роста затрат на добычу и переработку минерального сырья, обусловленного увеличением глубины разработки и уменьшением содержания полезных компонентов в балансовых запасах, повышением комплексности и полноты извлечения полезных ископаемых из недр [1].

Анализ теоретических исследований и практики подземной разработки месторождений показывает, что повышение уровня извлечения полезных ископаемых из недр достигается применением комбинированной системы разработки (КСР), сочетающей в пределах одного добычного блока элементы систем различных классов [2–6].

Для условий пологозалегающих месторождений вкрапленных медно-никелевых руд (Норильск-1, Масловское и др.) обоснована КСР, сочетающая этажно-камерную систему и систему этажного принудительного обрушения с торцовым выпуском руды, позволяющая существенно улучшить показатели потерь и разубоживания руды [7; 8]. Технология очистных работ предусматривает камерно-целиковый порядок выемки запасов этажа с расположением камер и междукамерных целиков (МКЦ) по простиранию залежи. Сначала вынимаются запасы камер, имеющих плоское днище, с использованием на выпуске и доставке руды погрузо-доставочных машин (ПДМ) с дистанционным управлением [9–12], затем выработанное пространство камер погашается путем принудительного обрушения налегающих пород. Далее вынимаются МКЦ системой этажного обрушения с послышной отбойкой и торцовым выпуском руды под предварительно разупрочненными налегающими породами.

Специфической особенностью КСР в условиях пологопадающих месторождений (до 15°) средней мощности (от 10 до 25 м) является необходимость формирования траншеи для выпуска руды из МКЦ в подстилающих породах [8]. Объем породной выпускной траншеи является одним из основных факторов, влияющих на эффективность КСР. Уменьшение объема породной выпускной траншеи МКЦ путем уменьшения угла откоса и высоты выпускной траншеи, с одной стороны, позволяет снизить эксплуатационные затраты на отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород, с другой стороны, приводит к ухудшению показателей извлечения руды, которые существенно влияют на извлекаемую ценность комплексных руд. Поиск оптимальных параметров породной выпускной траншеи в зависимости от ширины МКЦ является

основным направлением повышения эффективности КСР.

Таким образом, разработка методики определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при КСР пологопадающих месторождений является актуальной научно-технической задачей.

Материалы и методы

В качестве критерия эффективности КСР принят максимум прибыли Пр, отнесенной на 1 т погашаемых балансовых запасов [13]. Данный критерий позволяет учитывать изменение потерь и разубоживания руды и эксплуатационных затрат на основные технологические процессы добычи руды в зависимости от исследуемых факторов – мощности и угла падения залежи, ширины камеры и МКЦ, угла откоса и высоты выпускной траншеи МКЦ (табл. 1).

Методика оценки эффективности и определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при КСР пологопадающих месторождений состоит в последовательном выполнении 7 этапов:

1. Определение балансовых запасов блока $Q_{\text{бал}}$, т, в зависимости от $m_{\text{рт}}$, $B_{\text{к}}$, $B_{\text{МКЦ}}$ и $\alpha_{\text{рт}}$:

$$Q_{\text{бал}} = \frac{m_{\text{рт}} L_{\text{бл}} (B_{\text{к}} + B_{\text{МКЦ}}) \gamma_{\text{р}}}{\cos \alpha_{\text{рт}}}, \tag{1}$$

где $m_{\text{рт}}$ – мощность залежи, м; $L_{\text{бл}}$ – длина блока, м; $B_{\text{к}}$, $B_{\text{МКЦ}}$ – ширина камеры и МКЦ, м; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность руды в массиве, т/м³; $\alpha_{\text{рт}}$ – угол падения залежи, град.

2. Расчет параметров породной выпускной траншеи МКЦ (рис. 1) в зависимости от $B_{\text{МКЦ}}$ и $\alpha_{\text{рт}}$.

Базовый (минимальный) угол откоса выпускной траншеи МКЦ $\beta_{\text{отк}}$ ограничен углом истечения руды $\beta_{\text{ист}}$ [14] и принимается $\beta_{\text{отк}} \leq 65^\circ$.

Таблица 1
Основные факторы, влияющие на показатели эффективности КСР

Table 1
Main factors influencing the efficiency indicators of the combined mining system

Фактор изменения	Диапазон	Показатели, зависящие от фактора
Мощность залежи $m_{\text{рт}}$, м	10–25	– балансовые запасы блока; – удельный объем ПНР;
Угол падения залежи $\alpha_{\text{рт}}$, град	7	– потери и разубоживание руды; – затраты на ПНР
Ширина камеры $B_{\text{МКЦ}}$, м	8–0	– удельный объем ПНР; – потери и разубоживание руды;
Ширина МКЦ $B_{\text{МКЦ}}$, м	8–20	– объем выпускной траншеи; – затраты на ПНР и очистную выемку
Угол откоса выпускной траншеи $\beta_{\text{отк}}$, град	55–65	– потери и разубоживание руды; – высота выпускной траншеи;
Высота выпускной траншеи $h_{\text{вт}}$, м	3,3–18,4	– объем выпускной траншеи; – затраты на очистную выемку

Производный (максимальный) угол откоса выпускной траншеи МКЦ $\beta_{отк}'$, град, зависит от $\beta_{отк}$ и $\alpha_{рт}$ и определяется по формуле:

$$\beta_{отк}' = \arctg \left(\operatorname{tg} \beta_{отк} + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha_{рт} B_{МКЦ}}{B_{МКЦ} - B_{бд}} \right), \quad (2)$$

где $B_{бд}$ – ширина буро-доставочной выработки, м. Высота выпускной траншеи МКЦ $h_{вт}$, м, зависит от $\beta_{отк}$ и $B_{МКЦ}$:

$$h_{вт} = 0,5 [\operatorname{tg} \beta_{отк} (B_{МКЦ} - B_{бд}) + \operatorname{tg} \alpha_{рт} B_{МКЦ}], \quad (3)$$

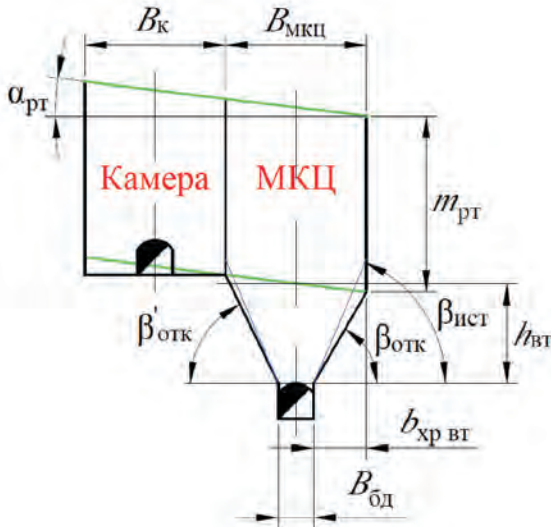


Рис. 1
Схема к расчету параметров породной выпускной траншеи МКЦ

Fig. 1
A schematic drawing for calculating the parameters of the rock release trench of the interchamber pillar

3. Расчет потерь П и разубоживания Р по блоку, %, в зависимости $m_{рт}$, $B_{МКЦ}$ и $h_{вт}$

$$П = 100 \{ 0,5 [h_{вт} \operatorname{ctg} \beta_{ист} + 0,5 B_{бд} + 0,5 B_{МКЦ}] [B_{МКЦ} - B_{бд}] \operatorname{tg} \beta_{ист} + [m_{рт} + h_{вт} - B_{МКЦ} (B_{МКЦ} - B_{бд}) \operatorname{tg} \beta_{ист}] \} / m_{рт} B_{МКЦ}; \quad (4)$$

$$Р = \{ 0,5 (m_{рт} + h_{вт}) [(2 (m_{рт} + h_{вт}) \operatorname{ctg} \beta_{ист} + B_{бд}) W + 0,7 B_{бд} h_{бд}] - [0,5 (h_{вт} \operatorname{ctg} \beta_{ист} + 0,5 B_{бд} + 0,5 B_{МКЦ}) (B_{МКЦ} - B_{бд}) \operatorname{tg} \beta_{ист} + (m_{рт} + h_{вт} - B_{МКЦ} (B_{МКЦ} - B_{бд}) \operatorname{tg} \beta_{ист})] W \} / 0,5 (m_{рт} + h_{вт}) \{ [2 (m_{рт} + h_{вт}) \operatorname{ctg} \beta_{ист} + B_{бд}] W + 0,7 B_{бд} h_{бд} \}; \quad (5)$$

где W – толщина отбиваемого слоя, м; $h_{бд}$ – высота буро-доставочной выработки, м.

4. Расчет удельных эксплуатационных затрат на основ-

ные технологические процессы добычи руды по блоку, включая:

а) затраты на проходку подготовительно-нарезных выработок $C_{пнв}$ в зависимости от $m_{рт}$, B_k и $B_{МКЦ}$, руб/т:

$$C_{пнв} = [29,2 (88,2 (B_k + B_{МКЦ}) + 3583) + 37,5 (((5,4 + 0,1 m_{рт}) (B_k + B_{МКЦ})) + 4 m_{рт})] / m_{рт} (B_k + B_{МКЦ}); \quad (6)$$

б) затраты на отбойку руды $C_{отб}$ в зависимости от $m_{рт}$, B_k , $B_{МКЦ}$ и $h_{вт}$ руб/т:

$$C_{отб} = [318,1 (m_{рт} B_k - S_{бд}) L_k + 460,7 (m_{рт} B_{МКЦ} + 0,5 ((B_{МКЦ} + B_{бд}) h_{вт})) L_{МКЦ}] / 300 m_{рт} (B_k + B_{МКЦ}); \quad (7)$$

в) затраты на выпуск и доставку руды $C_{вд}$ в зависимости от $m_{рт}$, B_k , $B_{МКЦ}$ и $h_{вт}$ руб/т:

$$C_{вд} = [74,2 (Q_{ов}^{бл} + 0,5 (B_{кон}^{max} + B_{бд}) h_{вт})] / 3 m_{рт} (B_k + B_{МКЦ}) L_{бл}; \quad (8)$$

г) затраты на принудительное обрушение налегающих пород $C_{онп}$ в зависимости от $m_{рт}$, B_k , $B_{МКЦ}$ и $h_{вт}$ руб/т:

$$C_{онп} = 218,7 [((h_{вт} / \operatorname{tg} \beta_{ист} + B_{бд}) h_{вт} + m_{рт} B_{МКЦ}) - 0,5 (B_{МКЦ} - B_{кон}^{max}) \operatorname{tg} \beta_{ист} + S_{бд}^{штп}] / 1,5 B_{МКЦ}; \quad (9)$$

5. Расчет извлекаемой ценности руды $Ц_{изв}$ по блоку с учетом П и Р [13].

6. Расчет полной себестоимости добычи $C_{доб}$ как суммы затрат на основные процессы добычи руды по блоку, общешахтных затрат, учитывающих вспомогательные процессы, и накладных расходов.

7. Определение величины прибыли $П_r$ и установление оптимальных параметров – угла откоса и высоты выпускной траншеи для различной ширины МКЦ:

$$П_r = Ц_{изв} - C_{доб} \rightarrow \max, \text{руб/т}. \quad (10)$$

Результаты

На основе экономико-математического моделирования (ЭММ) определены оптимальные угол откоса и высота выпускной траншеи МКЦ при ширине МКЦ 8 м; 12 м; 16 м; 20 м, что соответствует мощности залежи 10 м; 15 м; 20 м; 25 м.

Увеличение ширины МКЦ и угла откоса траншеи приводит к существенному увеличению высоты траншеи (табл. 2). В свою очередь, увеличение высоты траншеи ведет к увеличению сечения и объема траншеи, что повышает затраты на её формирование и разубоживание, но снижает потери.

Получены зависимости потерь и разубоживания руды по

Таблица 2
Изменение высоты траншеи
в зависимости от ширины МКЦ
и угла откоса траншеи

Угол откоса траншеи, град	Ширина МКЦ, м			
	8	12	16	20
55	3,3	6,4	9,6	12,7
60	4,0	7,7	11,4	15,1
65	4,8	9,3	13,8	18,4

Table 2
Changes in the height of the
trench depending on the
width of the interchamber
pillar and the angle of the
trench slope

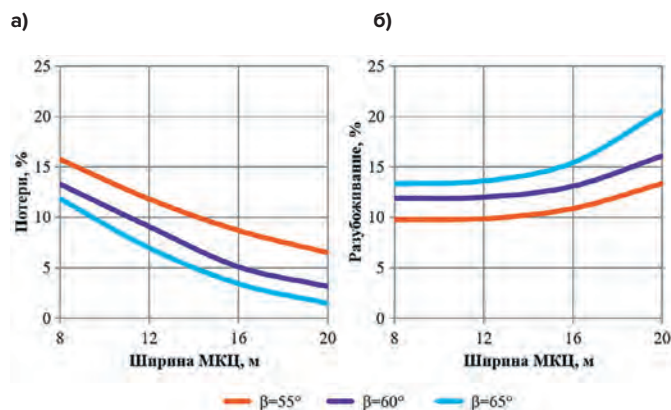


Рис. 2
Зависимости показателей
потерь (а) и разубоживания (б)
при КСР от ширины МКЦ при
различных углах откоса
выпускной траншеи

Fig. 2
Dependences of loss (a)
and dilution (б)
indicators in the combined
mining system on the width
of the interchamber pillar
and the angles of the release
trench

блоку при КСР от ширины МКЦ, соответствующей мощности залежи, при различном угле откоса выпускной траншеи (рис. 2).

Анализ графиков (см. рис. 2) показывает, что:

- с увеличением $B_{МКЦ}$ и $\beta_{отк}$ потери снижаются, а разубоживание увеличивается;

- во всем диапазоне изменения $B_{МКЦ}$ наименьшие потери достигаются при $\beta_{отк} = 65^\circ$, а наименьшее разубоживание – при $\beta_{отк} = 55^\circ$.

С учетом особенностей конструкции КСР определены затраты на ПНР, отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород (рис. 3). Следует отметить, что угол откоса выпускной траншеи не оказывает влияния на затраты на ПНР (на рис. 3, а представлены одним графиком).

Анализ графиков (см. рис. 3) показывает, что:

- с увеличением $B_{МКЦ}$ удельные затраты на ПНР и на обрушение налегающих пород снижаются, а на отбойку, выпуск и доставку руды – повышаются;

- с увеличением $\beta_{отк}$ удельные затраты на отбойку, выпуск и доставку руды, и обрушение налегающих пород повышаются;

- во всем диапазоне изменения $B_{МКЦ}$ наименьшие удельные затраты на процессы очистной выемки обеспечиваются при $\beta_{отк} = 55^\circ$.

С учетом зависимостей извлекаемой ценности и полной себестоимости добычи руды установлено влияние рассмотренных факторов на прибыль (рис. 4).

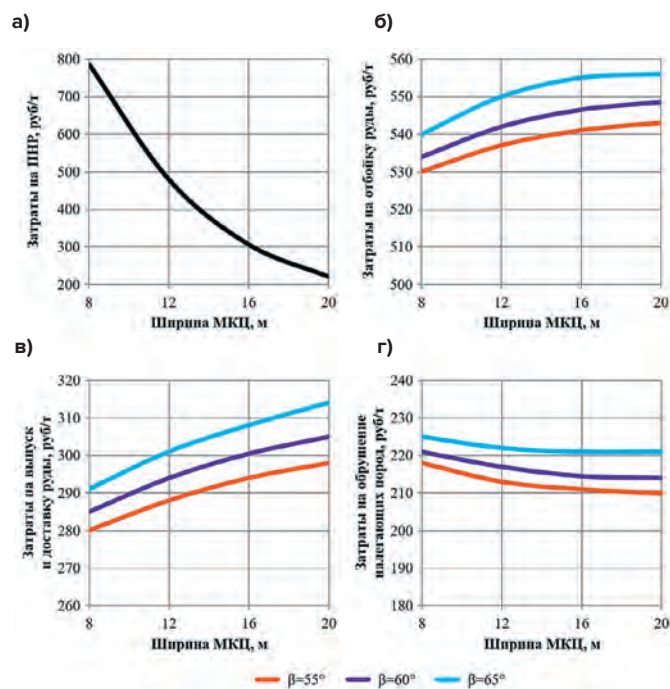


Рис. 3
Зависимость удельных затрат
на ПНР (а), отбойку (б), выпуск
и доставку руды (в), обрушение
налегающих пород (г) при КСР
от ширины МКЦ при различных
углах откоса выпускной
траншеи

Fig. 3
Dependences of the costs
of preparatory-development
operations (a), ore
breaking and
delivery of ore (б), caving
of the overlying rocks (г)
depending on the width of the
interchamber pillar and the
angles of the release trench

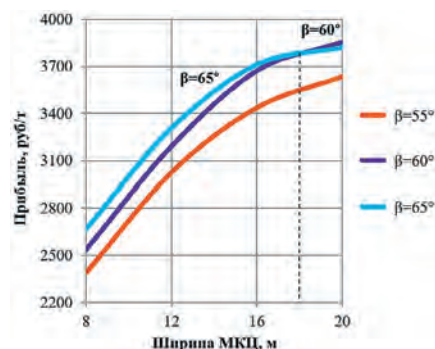


Рис. 4
Зависимость прибыли от
ширины МКЦ при различных
углах откоса выпускной
траншеи

Fig. 4
Dependence of profit on the
width of the interchamber
pillar at different angles of the
release trench

Установлено, что оптимальные угол откоса и высота выпускной породной траншеи МКЦ по критерию максимальной прибыли:

- при $B_{МКЦ} = 8-18$ м – $\beta_{отк} = 65^\circ$ и $h_{вт} = 4,8-16,1$ м за счет минимальных потерь руды;

- при $B_{МКЦ} = 18-20$ м – $\beta_{отк} = 60^\circ$ и $h_{вт} = 13,2-15,1$ м за счет меньших затрат на отбойку, выпуск и доставку руды, обрушение налегающих пород относительно $\beta_{отк} = 65^\circ$.

Наиболее экономичный по затратам вариант траншеи с $\beta_{отк} = 55^\circ$ вследствие высоких потерь имеет наименьшую прибыль.

Заключение

Разработана методика оценки эффективности и определения оптимальных параметров породной выпускной траншеи при КСР пологопадающих месторождений по критерию прибыли на 1 т погашаемых балансовых запасов, включающая установленные функциональные зависимости показателей извлечения руды и эксплуатационных затрат на основные технологические процессы добычи руды от мощности и угла падения залежи, ширины камеры и МКЦ, угла откоса и высоты выпускной траншеи МКЦ.

В результате экономико-математического моделирования установлено, что оптимальные угол откоса и высота выпускной породной траншеи МКЦ при ширине МКЦ 8–18 м составляет 65° и 4,8–16,1 м, при ширине МКЦ 18–20 м – 60° и 13,2–15,1 м соответственно.

5. Список литературы / References

1. Яковлев В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2022;(1S):34–45. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45>
Yakovlev V.L. Key stages and results of research to formulate methodological basis for the strategy to develop mining systems for deep seated deposits of solid minerals. *Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):34–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45>
2. Габараев О.З., Кожиев Х.Х., Хулелидзе К.К., Битаров В.Н. Ресурсосберегающие технологии закладки выработанного пространства при добыче богатых медно-никелевых руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2012;4(4):31–34. Режим доступа: <http://naukagor.ru/ru-ru/articles/ArtMID/2504/ArticleID/328/site-map> (дата обращения: 13.09.2024).
Gabaraev O.Z., Kozhiev K.K., Khulelidze K.K., Bitarov V.N. Resource-saving technologies backfilling during the mining of valuable copper-nickel ores. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2012;4(4):31–34. (In Russ.) Available at: <http://naukagor.ru/ru-ru/articles/ArtMID/2504/ArticleID/328/site-map> (accessed: 13.09.2024).
3. 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. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1072/2020>
4. Лукичев С.В., Любин А.Н. Повышение полноты извлечения и качества руд при разработке тонких пологих месторождений. *Проблемы недропользования*. 2016;(4):69–73. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.069>
Lukichev S.V., Ljubin A.N. Increase of ore extraction and quality when developing thin flat deposits. *Problems of Subsoil Use*. 2016;(4):69–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.069>
5. Никольский А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Тишков М.В., Семенов Д.П. Обоснование конструкций днищ блоков при системах разработки с камерно-целиковым порядком выемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(4):36–44. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2018/4/36_44_4_2018.pdf (дата обращения: 13.09.2024).
Nikolsky A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., Tishkov M.V., Semenov D.P. Evaluation of bottom designs for extraction blocks in room-and-pillar mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(4):36–44. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2018/4/36_44_4_2018.pdf (accessed: 13.09.2024).
6. 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):87–97.
Neverov A.A. Geomechanical substantiation of modified room-work in flat thick deposits with ore drawing under overhang. *Journal of Mining Science*. 2012;48(6):1016–1024. <https://doi.org/10.1134/S1062739148060093>
7. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):88–104. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_88
Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V. Justification of design and parameters of mixed mining system for gently dipping low-grade complex ore body. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):88–104. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_88
8. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд. *Проблемы недропользования*. 2022;(4):33–43. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.04.033>
Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V., Rozkov A.A., Nikitin I.V. Ways to improve the efficiency of underground mining of gently sloping deposits of low-grade complex ores. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(4):33–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.04.033>

9. Павленко С.В., Котов А.А. Система дистанционного управления погрузочно-доставочной машиной при подэтажном торцевом выпуске руды на подземном руднике «Удачный». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(S6):3–10.
Pavlenko S.V., Kotov A.A. The system of remote control of the loading and delivery machine at the underground end ore release at the Udachny underground mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(S6):3–10. (In Russ.)
10. Shimaponda-Nawa M., Nwaila G.T. Integrated and intelligent remote operation centres (I2ROCs): Assessing the human-machine requirements for 21st century mining operations. *Minerals Engineering*. 2024;207:108565. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108565>
11. Gaber T., El Jazouli Y., Eldesouky E., Ali A. Autonomous haulage systems in the mining industry: Cybersecurity, communication and safety issues and challenges. *Electronics*. 2021;10(11):1357. <https://doi.org/10.3390/electronics10111357>
12. Yu H., Zhao C., Li S., Wang Z., Zhang Y. Pre-Work for the birth of driver-less scraper (LHD) in the underground mine: The path tracking control based on an LQR controller and algorithms comparison. *Sensors*. 2021;21(23):7839. <https://doi.org/10.3390/s21237839>
13. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. *Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений*. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета; 2021. 340 с.
14. Барановский К.В., Антонов В.А., Соколов И.В. Закономерности изменения потерь и разубоживания в комбинированной системе подземной добычи кварцевого сырья. *Проблемы недропользования*. 2017;(1):29–37. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.029>
Baranovsky K.V., Antonov V.A., Sockolov I.V. The regularities of variation losses and dilution in the combined system of quartz raw material mining. *Problems of Subsoil Use*. 2017;(1):29–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.029>

Информация об авторах

Антипин Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>; e-mail: geotech@igduran.ru

Смирнов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: opening-kp@yandex.ru

Соломеин Юрий Михайлович – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: yuriysolo@mail.ru

Information about the authors

Yuri G. Antipin – Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Chief, Institute of Mining Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>; e-mail: geotech@igduran.ru

Alexey A. Smirnov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Institute of Mining Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: geotech@igduran.ru

Igor V. Nikitin – Scientific Researcher, Institute of Mining Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: opening-kp@yandex.ru

Yuri M. Solomein – Scientific Researcher, Institute of Mining Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: yuriysolo@mail.ru

Article info

Received: 18.08.2024

Revised: 02.10.2024

Accepted: 08.10.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.08.2024

Поступила после рецензирования: 02.10.2024

Принята к публикации: 08.10.2024