

Определение рациональных параметров технологии с обрушением и торцовым выпуском руды в условиях северных регионов России

Смирнов А. А.¹, Барановский К. В.¹, Рожков А. А.¹, Никитин И. В.^{1*}

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: geotech@igduran.ru

Реферат

Актуальность темы. В суровых климатических условиях северных регионов России изоляция подземных горных выработок от карьерного пространства является весьма важным вопросом. При системах разработки с обрушением руды для изоляции подземного рудника на дне карьера формируется предохранительная подушка из разрыхленной горной массы. Параметры предохранительной подушки в значительной мере влияют на эффективность подземной геотехнологии. В связи со сложными горно-геологическими условиями применение эффективных технологий этажного принудительного обрушения с площадным выпуском руды и высотой этажа до 100 м достаточно проблематично с точки зрения сохранения выпускных выработок. Перспективным является применение технологии подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды. Таким образом, установление оптимальных конструктивных параметров данной системы разработки с учетом специфических условий ведения работ под предохранительной подушкой является актуальной научно-технической задачей.

Цель исследований – разработка методических положений, позволяющих рационализировать параметры конструкции системы разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды в зависимости от гранулометрического состава рудной массы, параметров и материала предохранительной подушки, формируемой на дне карьера.

Методы исследований. В работе использован комплексный метод исследований, включающий оценку влияния свойств горной массы на параметры выпуска руды под предохранительной подушкой и оптимизацию конструктивных параметров системы разработки подэтажного обрушения по критерию эффективных показателей извлечения в сложных условиях добычи.

Результаты исследований. Установлены требования к гранулометрическому составу материала предохранительной подушки, при которых обеспечивается необходимая для эффективного функционирования подземного рудника степень изоляции очистного пространства. В зависимости от параметров предохранительной подушки определены высота и ширина выемочных единиц, обеспечивающие рациональные показатели извлечения при системе разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.

Выводы. Применение системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды в рассматриваемых условиях позволяет исключить проблему сохранения выработок на весь период отработки этажа и дает возможность рационально организовать процесс проветривания рудника в условиях действия значительных естественных тяг.

Ключевые слова: подземная разработка; предохранительная подушка; подэтажное обрушение; торцовый выпуск; гранулометрический состав; показатели извлечения.

Введение. Рудник «Удачный» обрабатывает месторождение кимберлитов, разветвляющееся ниже дна карьера на два вертикальных конусообразных рудных тела – западное (ЗРТ) и восточное (ВРТ). Рудные тела в поперечнике имеют

размеры около 300 м и прослеживаются до глубины 1400 м с постепенным уменьшением площади поперечного сечения. Угол падения ЗРТ достигает 85°, ВРТ – 80°. Согласно проекту, предусмотрена система разработки подкарьерных запасов трубки «Удачная» с обрушением руды под предохранительной подушкой [1–3].

Предохранительная подушка позволяет исключить аэродинамические связи атмосферы карьера с подземными выработками рудника в процессе выпуска руды. Ее формирование над запасами ВРТ осуществляется за счет оставления над горизонтом выпуска отбитой, но не выпускаемой руды, над запасами ЗРТ – путем навала пустых пород на дне карьера.

При предусмотренной проектом системе этажного принудительного обрушения с площадным выпуском руды сохранение выпускных отверстий и погрузочных заездов на весь период выпуска больших объемов руды при высоте этажа до 100 м достаточно проблематично, вследствие чего на руднике «Удачный» перспективным является применение подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды. Таким образом, установление оптимальных конструктивных параметров данной системы разработки с учетом гранулометрического состава рудной массы и особенностей процесса выпуска под предохранительной подушкой в рамках исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений [4] является актуальной научно-технической задачей.

Методика проведения исследований. Известно, что качество дробления существенно влияет на процесс выпуска руды и показатели извлечения. Также от гранулометрического состава слагающих руд или пород в значительной степени зависит аэродинамическое сопротивление предохранительной подушки, что в суровых климатических условиях северных регионов России является не менее важным вопросом, поскольку проникновение холодного воздуха в очистное пространство и горные выработки приводит к смерзанию руды и прочим негативным последствиям [5–7].

С использованием методики [8] установлена зависимость необходимой толщины предохранительной подушки по условию обеспечения достаточной изолированности и сохранности подземных горных выработок. Данное значение зависит от среднего диаметра слагающей подушку куска горной массы d_{cp} и высоты падения пород в случае обрушения участка борта карьера H (рис. 1).

Размер среднего куска является не единственным показателем гранулометрического состава, определяющим характеристики предохранительной подушки. Важно также соотношение фракций в раздробленном материале. Для увеличения аэродинамического сопротивления подушки необходимо повышение содержания в ней фракций меньше 150 мм [9].

Исследования гранулометрического состава раздробленных пород показали, что соотношение между вероятным содержанием разных фракций носит закономерный характер и может быть выражено уравнением Розина–Рамллера [10–12]:

$$P(x) = 1 - e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где $P(x)$ – вероятность суммарного выхода кусков размером больше x , %; α – коэффициент, зависящий от условий взрывания и свойств руды.

Для скальных руд α может быть принят в пределах 1,5–3,5, причем с возрастанием α растет выход мелких фракций. На рис. 2 в виде кумулятивных кривых

представлены результаты измерений гранулометрического состава отбитых руд на шахтах Урала [13]. При сходных прочностных свойствах горных пород и параметрах буровзрывных работ, повышенный относительно шахты «Южная» выход мелких фракций на Кыштымском руднике связан с мелкозернистой структурой и слабой спайностью зерен гранулированного кварца [14, 15].

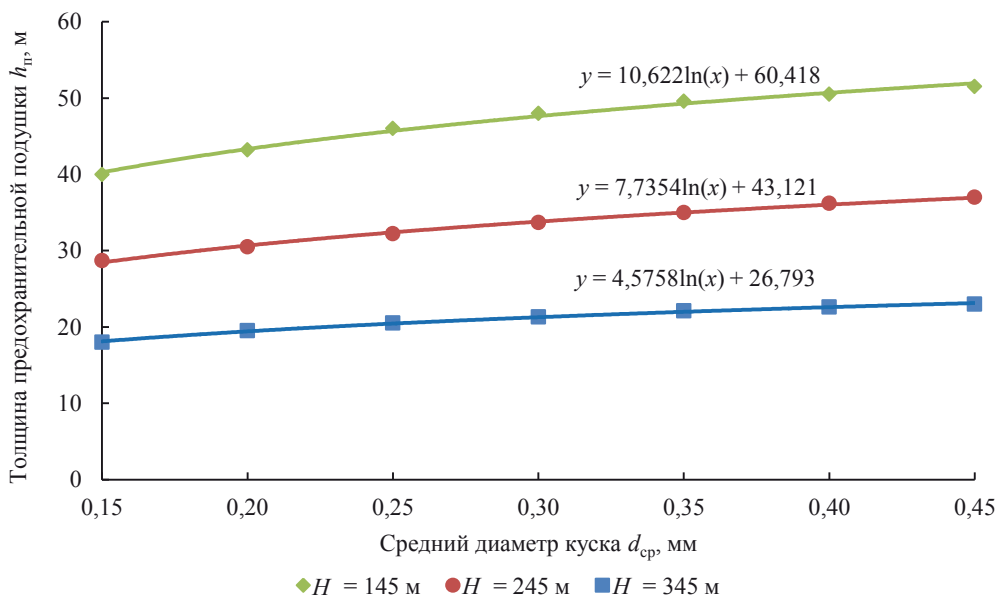


Рисунок 1. Изменение толщины предохранительной подушки в зависимости от среднего диаметра куска горной массы

Figure 1. Change in the protective cushion thickness depending on the average diameter of a rock lump

Кимберлиты относятся к слабым породам, их крепость изменяется от 5 до 7 по шкале М. М. Протоdjаконова. Рудный массив разбит несколькими системами трещин на естественные отдельные размеры 0,2–0,5 м. Прочностные характеристики руд приведены в табл. 1.

Принятые в проекте разработки параметры буровзрывных работ для отбойки кимберлита близки к таковым на уральских шахтах. Вследствие небольшой прочности кимберлита можно прогнозировать, что при массовой отбойке его вероятный гранулометрический состав будет соответствовать уравнению (1) при значении $\alpha = 2,8–3,0$ с достаточно высоким выходом мелких фракций (до 40–50 %). Средний диаметр куска будет равен 0,20–0,22 м, а выход негабарита более 800 мм – 3–6 %. Такой гранулометрический состав благоприятен для обеспечения необходимого сопротивления подушки.

Опыт показывает, что полностью предотвратить фильтрацию воздуха вследствие естественных тяг через обрушенную руду или породу невозможно. При системе поэтажного обрушения данная проблема решается за счет создания подпора воздуха, подаваемого к выпускным отверстиям при помощи вентиляторов местного проветривания, применение которых является неотъемлемой частью данной технологии.

Результаты исследований. Два варианта образования предохранительной подушки подразумевают и разный подход к определению параметров системы.

Для ВРТ, где подушка формируется из отбитой руды и нет налегающих пород, проблемы разубоживания нет. Параметры системы определяются с учетом обеспечения необходимой толщины предохранительной подушки, устойчивости выработок и требованиями оптимизации технологических процессов. Для ЗРТ, где подушка состоит из пустых пород вскрыши, параметры системы в основном определяются требованиями оптимизации показателей извлечения руды [16–18].

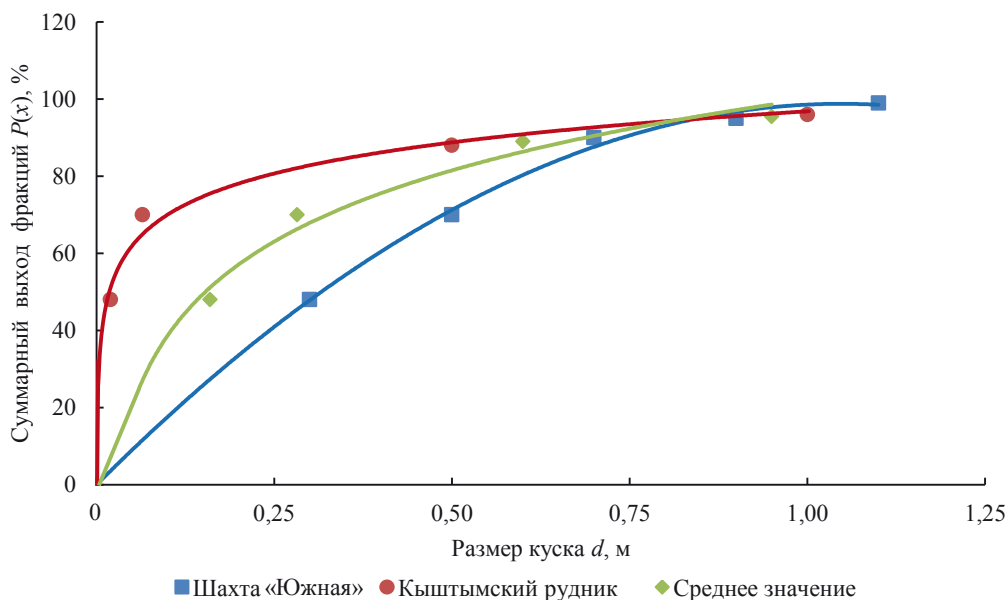


Рисунок 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава отбитой руды
 Figure 2. Cumulative curves of broken ore granulometric composition

Особенностью торцевого выпуска руды является тесная связь между параметрами послонной отбойки, степенью уплотнения отбитой руды и процессом истечения рудной массы [19–21]. Исследования [22, 23] позволяют представить качественную картину отбойки и последующего выпуска руды. При взрывании веера скважин происходит подвижка отбиваемого слоя и уплотнение зажимающей среды. Вследствие дилатансии отбиваемого слоя под действием продуктов взрыва рудная масса разрыхляется и заполняет весь образовавшийся объем.

Таблица 1. Прочностные характеристики руд трубки «Удачная»
 Table 1. Strength characteristics of ores from the Udachnaya pipe

Происхождение руды	Прочность на сжатие, МПа		Прочность на растяжение, МПа	
	min–max	средняя	min–max	средняя
ЗРТ	2,77–46,71	16,9	1,06–9,16	3,57
ВРТ	5,55–60,0	25,7	1,86–7,86	3,78

При толщине отбиваемого слоя руды 3 м величина подвижки для типичных условий составляет около 1 м. Таким образом, толщина слоя отбитой руды равняется примерно 4 м, а коэффициент ее разрыхления составляет 1,33. После выпуска этого слоя данный объем заполняет налегающая порода подушки с коэффициентом разрыхления около 1,5. При отбойке следующего слоя происходит

уплотнение прилегающего к массиву слоя породы, что приводит к снижению его коэффициента разрыхления до 1,15–1,25. При такой величине порода теряет свойства сыпучести и при выпуске зона потока ограничивается щелью между рудным массивом и уплотненной породой предшествующих слоев, напоминая движение материала в плоском бункере. Причем устойчивость уплотненной «стенки» поддерживается боковым распором потока руды. Таким образом, выше уровня кровли доставочной выработки образуется слой уплотненной породы, примерно равный высоте подэтажа. Нижняя часть отбиваемого слоя руды при взрыве частично выбрасывается, а частично высыпается в выработку, в результате чего коэффициент разрыхления этой части руды над кровлей выработки равен 1,5–1,6.

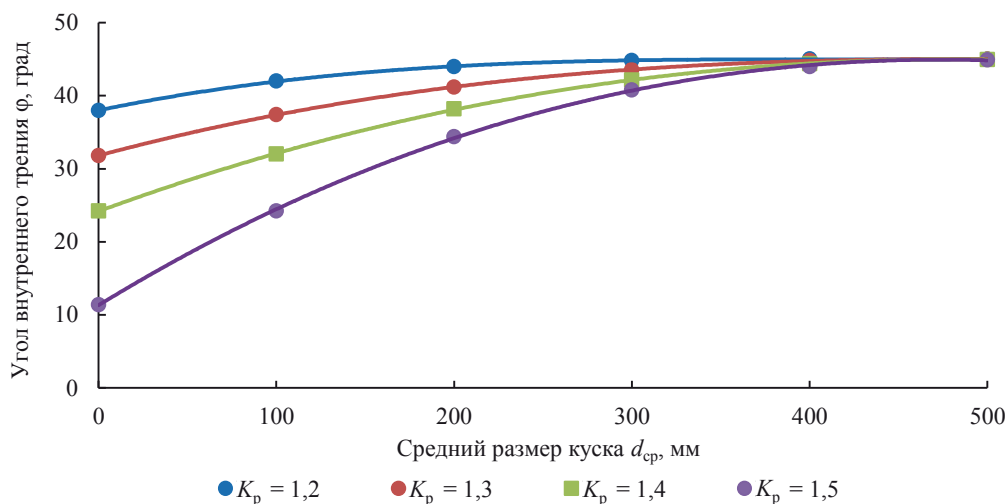


Рисунок 3. Зависимость угла внутреннего трения от коэффициента разрыхления и среднего куска отбитой руды
Figure 3. The dependence of the internal friction angle on the coefficient of loosening and the average lump of broken ore

Сыпучие свойства материала в этих условиях определяются углом внутреннего трения φ , который в соответствии с исследованием [24] зависит от коэффициента разрыхления K_p и среднего диаметра куска отбитой руды d_{cp} и представлен в виде зависимости (рис. 3).

В свою очередь показатель φ определяет угол наклона образующей потока руды β , град [25]:

$$\beta = 45 + 0,5 \arcsin \operatorname{tg} \varphi.$$

В рассматриваемых условиях угол β находится в пределах 66° – 80° . Истечение руды происходит в пределах зоны потока горизонтальными слоями определенной высоты без смешивания их между собой. В начальный период выпуска зона потока ограничивается выходом на вертикальную границу обрушенных пород, а ее объем зависит от площади активного сечения на уровне кровли выработки.

При отгрузке руды погрузо-доставочными машинами и свободном истечении руды размеры активного сечения определяются шириной доставочной выработки и глубиной внедрения ковша (до 1,5 м). Однако при выпуске руды рассматриваемой кусковатости с частотой одного на каждые 10 м^3 происходят зависания,

которые ликвидируются или подбором навала руды, или непосредственным воздействием ковша машины на зависание. Максимальная величина подбора навала руды ограничивается положением ковша машины под козырьком выпускного отверстия. При откосе руды порядка 45° максимальная глубина активного сечения равна высоте выработки и составляет 3,5 м. Тогда в процессе выпуска руды глубина активного сечения будет варьироваться в пределах 1,5–3,5 м и для дальнейших расчетов в соответствии с [26–28] принято ее среднее значение – 2,5 м.

Таблица 2. Потери и разубоживание руды при выемке верхнего подэтажа
Table 2. Ore loss and dilution during the extraction of the upper sublevel

Параметр	Разрезная секция			Смежная секция		
	25	30	35	25	30	35
Высота секции, м	25	30	35	25	30	35
Ширина секции						
12 м	8,2/-*	7,4/-	6,8/-	6,0/5,0	4,8/9,2	4,0/13,4
16 м	15,4/-	12,7/-	10,9/-	14,8/3,2	11,5/2,2	9,4/5,1
20 м	25,4/-	19,9/-	16,6/-	25,9/1,2	19,7/1,0	15,5/0,9

* В числителе указаны потери, %; в знаменателе – разубоживание, %.

Как отмечено ранее, коэффициенты разрыхления в нижней и верхней частях слоя существенно отличаются. В результате происходит сужение зоны потока руды. Объем выпуска чистой руды определяется выходом зоны потока на вертикальную границу секции. При этом существенного фронтального разубоживания руды не происходит. Выше в течение вовлекается сначала боковая порода, расположенная на месте ранее отработанной смежной секции, а затем или налегающая порода предохранительной подушки, или рудная масса на уровне выработок вышележащего горизонта и смесь породы и руды в гребнях, оставшихся при отработке вышележащего подэтажа.

Таблица 3. Потери и разубоживание руды при выемке нижних подэтажей
Table 3. Ore loss and dilution during the extraction of the underlying sublevels

Параметр	Разрезная секция			Смежная секция		
	25	30	35	25	30	35
Высота секции, м	25	30	35	25	30	35
Ширина секции						
12 м	8,0/25,3	7,3/21,8	6,9/19,1	4,9/33,9	4,0/34,1	3,4/35,0
16 м	12,3/31,7	10,7/27,4	9,6/24,2	10,8/34,7	9,0/33,1	7,6/32,7
20 м	17,5/38,1	14,9/33,1	13,1/29,2	17,0/37,9	14,1/34,9	12,1/33,1

На основе приведенных соображений составлен алгоритм расчета показателей извлечения руды при подэтажном обрушении с торцовым выпуском руды. Принята схема, в которой подэтажные выработки в этаже расположены в шахматном порядке. Результаты расчета показателей извлечения для верхнего подэтажа приведены в табл. 2.

Особенностью отработки верхней секции является то, что здесь существует предел выпуска руды, после которого потери руды не уменьшаются. Верхний уровень подушки снижается на 22–28 м, причем над горизонтом выпуска образуется слой уплотненной взрывами породы. Рациональная высота секции определяется оптимальной длиной скважин и может составлять 35–40 м.

Результаты расчета показателей извлечения для нижележащих подэтажей приведены в табл. 3.

На рис. 4 представлена зависимость потерь и разубоживания от видимого извлечения запасов, анализ которой показывает, что рациональные значения показателей составляют 10–12 % и 13–15 %, соответственно.

Установлено, что для образования рудной предохранительной подушки над ВРТ высота первого подэтажа должна быть не менее 30 м, а высота остающихся в подушке рудных целиков не более 30 м, что при угле наклона образующих траншеи 60° возможно при расстоянии между осями доставочных выработок 39 м.

При отсутствии налегающих пород и высоте подэтажа 30 м объем добытой руды будет минимальным, определяемым только необходимой степенью разрыхления руды перед отбойкой очередного слоя. Вследствие этого высоту верхнего подэтажа целесообразно увеличить до 40–45 м исходя из оптимальной длины скважин.

При шахматном расположении выработок в нижележащих подэтажах взрывание оставшихся в подушке целиков будет затруднено из-за большой длины скважин. Вследствие этого целесообразно уменьшить расстояние между доставочными выработками (ширину панели) до 22 м. Тогда высота целиков в подушке будет составлять около 15 м. Такая схема расположения выработок может быть принята для всех запасов руды под рудной предохранительной подушкой. При этом руда в подушке во всех случаях будет переуплотнена, что следует учитывать в режимах ее выпуска и порядке отработки смежных панелей.

Заключение. В условиях рудника «Удачный» достаточно перспективным является применение системы подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды, что позволяет исключить проблему сохранения выработок на весь период отработки этажа, значительно упрощает переход с этажа на этаж, дает возможность рационально организовать процесс проветривания рудника в условиях действия значительных естественных тяг. Приведенные методические положения позволяют с учетом гранулометрического состава рудной массы рационализировать параметры конструкции системы разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды в зависимости от материала предохранительной подушки, формируемой на дне карьера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коваленко А. А., Тишков М. В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением // ГИАБ. 2016. № 12. С. 134–145.
2. Булатов К. В., Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С., Кульминский А. С., Тишков М. В., Кульминский А. А. Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии. Екатеринбург: Уралмеханобр, 2022. 544 с.

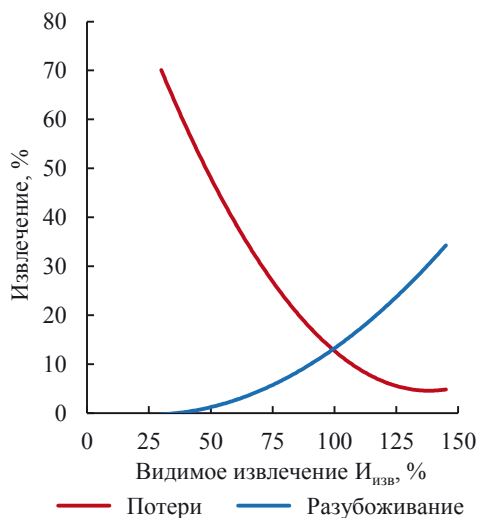


Рисунок 4. Зависимость потерь и разубоживания от видимого извлечения запасов

Figure 4. Dependence of losses and dilution on the visible extraction of reserves

3. Tishkov M. Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018. P. 835–846. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_66_Tishkov
4. 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. № S1. С. 34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45
5. Хохолов Ю. А. Особенности процессов тепло- и массообмена, происходящих в предохранительной подушке при подземной доработке подкарьерных запасов // ГИАБ. 2020. № 2. С. 13–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21
6. Необутов Г. П., Зубков В. П., Петров Д. Н. Зависимость потерь руды при выпуске вследствие ее смерзания от гранулометрического состава и параметров очистного пространства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 5(117). С. 22–28.
7. Kurylyk B. L., MacQuarrie K. T. B., McKenzie J. M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools // Earth-Science Reviews. 2014. Vol. 138. P. 313–334. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006
8. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В., Тишков М. С. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // ФТПРПИ. 2018. № 2. С. 52–62. DOI: 10.15372/FTPRPI20180207
9. Токмаков В. В., Соколов И. В., Ермолаев А. И. К вопросу учета в расчетах шахтного воздухораспределения дополнительных аэродинамических связей подземных горных работ с карьером при комбинированной отработке месторождений // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2017. С. 63–65.
10. Бондаренко И. Ф., Жариков С. Н., Зырянов И. В., Шеменов В. Г. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии. Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2017. 172 с.
11. Onederra I., Riihioja K. An alternative approach to determine the uniformity index of Rosin–Rammler based fragmentation models // Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blast. 2006. P. 193–199.
12. Nourian A., Moomivand H. Development of a new model to predict uniformity index of fragment size distribution based on the blasthole parameters and blastability index // Journal of Mining Science. 2020. Vol. 56. P. 47–58. DOI: 10.1134/S1062739120016478
13. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Technology of blasting of strong valuable ores with ring borehole pattern // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 237. P. 285–291. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.285
14. Соколов И. В., Корнилов С. В., Сашурин А. Д., Кузьмин В. Г., Шемакин В. С. О формировании научно-технологического задела для внедрения комплексной геотехнологии добычи и переработки высококачественного кварца // Горный журнал. 2014. № 12. С. 44–49.
15. Горинов С. А. Эффективность применения плоских систем зарядов для отбойки сильнотрещиноватых руд в подземных условиях // Известия вузов. Горный журнал. 1985. № 7. С. 68–73.
16. Савич И. Н., Мустафин В. И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этажном и подэтажном торцевом выпуске руды // ГИАБ. 2015. № S1. С. 419–429.
17. Mijalkovski S., Despodov Z., Mirakovski D., Adjiski V. Methodology for optimization of coefficient for ore recovery in sublevel caving mining method // Podzemni Radovi. 2017. Vol. 30. P. 19–27. DOI: 10.5937/podrad1730019
18. Смирнов А. А., Барановский К. В. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами // Проблемы недропользования. 2022. № 3. С. 136–145.
19. Павленко С. В., Савич И. Н., Котов А. А. Управление выпуском руд под обрушенными породами // ГИАБ. 2022. № S6. С. 11–20.
20. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Колесников А. А., Беркович В. Х., Шадрин Д. М. Совершенствование технологии подземной добычи полиметаллических руд на Корбалихинском руднике АО «Сибирь-полиметаллы» // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 2. С. 36–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-1-36-47
21. Manzoor S., Gustafson A., Schunnesson H., Tariq M., Wettainen T. Rock fragmentation measurements in sublevel caving: field tests at LKAB's Malmberget mine // Caving 2022: Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2022. P. 381–392. DOI: 10.36487/ACG_repo/2205_26
22. Стажевский С. Б. Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с подэтажным обрушением // ФТПРПИ. 1996. № 5. С. 72–89.
23. Русин Е. П., Стажевский С. Б. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с подэтажным обрушением // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 2. № 2. С. 112–116.
24. Дубынин Н. Г., Храмов В. Ф. Управление выпуском руды при подземной разработке. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970. 119 с.

25. Стажевский С. Б. О второй форме течения сыпучих материалов в бункерах // ФТПРПИ. 1985. № 5. С. 3–16.

26. Жиронкин А. Ф. Исследование технологии и механизации выпуска руды на железорудных шахтах Урала: автореф. дис... канд. техн. наук. Свердловск, 1970. 30 с.

27. Zhang Z. X. Lost-ore mining – a supplementary mining method to sublevel caving // International journal of rock mechanics and mining sciences. 2023. Vol. 168. Art. 105420. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105420

28. Melo F., Vivanco F., Fuentes C., Apablaza V. On drawbody shapes: from Bergmark-Ross to kinematic models // International journal of rock mechanics and mining sciences. 2007. Vol. 44. P. 77–86. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.010

Поступила в редакцию 10 октября 2023 года

Сведения об авторах:

Смирнов Алексей Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech910@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

Барановский Кирилл Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: kartingist@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2572-166X>

Рожков Артем Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: 69artem@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3007-1099>

Никитин Игорь Владимирович – научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии Института горного дела УрО РАН. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-27-37

Determining the rational parameters of ore caving and frontal draw in the conditions of Russia's northern regions

Smirnov A. A.¹, Baranovskii K. V.¹, Rozhkov A. A.¹, Nikitin I. V.¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research relevance. In harsh weather conditions of Russia's northern regions, underground mine workings insulation against the open-pit space is an important issue. In mining systems with ore caving, a protective cushion of loosened rock mass is formed at the open-pit bottom to insulate the underground mine. The protective cushion parameters significantly affect the efficiency of the underground geotechnology. Due to difficult mining and geological conditions, the use of effective technologies for level caving with areal ore draw and a level height of up to 100 m is rather difficult from the point of view of draw workings preservation. The technology of sublevel caving with frontal ore draw is promising. Thus, the establishment of the optimal design parameters of the mentioed mining system, taking into account the specific conditions of work under a protective cushion, is an urgent scientific and technical task.

Research objective is to develop methodological provisions that allow rationalizing design parameters of the sublevel caving with frontal ore draw, depending on the ore mass granulometric composition and the parameters and material of the protective cushion at the open-pit bottom.

Method of research. The work uses a comprehensive research method, including an assessment of rock mass properties influence on the parameters of ore draw under protective cushion, as well as the optimization of sublevel caving design parameters according to the criterion of effective extraction indicators in difficult mining conditions.

Research results. The requirements are established for the protective cushion material granulometric composition which ensures the working space insulation degree required for the effective operation of the underground mine. Depending on the protective cushion parameters, the height and width of the extraction units are determined which provide rational extraction indicators of sublevel caving.

Conclusions. The sublevel caving with frontal ore draw makes it possible to eliminate the problem of maintaining workings for the entire period of level mining and rationally organize mine ventilation under conditions of significant natural drafts.

Keywords: underground mining; protective cushion; sublevel caving, frontal ore draw; granulometric composition; extraction indicators.

REFERENCES

1. Kovalenko A. A., Tishkov M. V. The evaluation of the Udachnaya pipe deposit underground mining using caving system. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 12: 134–145. (In Russ.)
2. Bulatov K. V., Dik Iu. A., Kotenkov A. V., Tankov M. S., Kulminskii A. S., Tishkov M. V., Kulminskii A. A. *New technological solutions of Yakutia kimberlite deposits development*. Ekaterinburg: Uralmekhanobr Publishing; 2022. (In Russ.)
3. Tishkov M. Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project. In: *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2018. P. 835–846. Available from: doi: 10.36487/ACG_rep/1815_66_Tishkov
4. Iakovlev 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. *Gornaya promyshlennost = Mining Industry*. 2022; S1: 34–45. (In Russ.) Available from: doi: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45
5. Khokholov Iu. A. Features of heat- and mass-exchange in a safety cushion in mining under open pit bottom. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 2: 13–21. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21
6. Neobutov G. P., Zubkov V. P., Petrov D. N. Dependent ore losses in discharge as a result of its freezing size distribution and parameters of working excavation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of The Kuzbass State Technical University*. 2016; 5(117): 22–28. (In Russ.)
7. Kurylyk B. L., MacQuarrie K. T. B., McKenzie J. M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth-Science Reviews*. 2014; 138: 313–334. Available from: doi: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006
8. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Antipin Iu. G., Nikitin I. V., Tishkov M. S. Substantiation of protective cushion thickness in mining under open pit bottom with the caving methods at Udachnaya pipe. *Fiziko-tekhnicheskii problemi razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2018; 2: 52–62. (In Russ.) Available from: doi: 10.15372/FTPPI20180207
9. Tokmakov V. V., Sokolov I. V., Ermolaev A. I. The question of account in the calculation of additional mine air distribution aerodynamic relations for underground mining with a quarry in combined mining of deposits. In: *Innovative geotechnology for ore fields and non-metallic deposits: Proceedings of 6th Internat. scient. and techn. conf.* Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2017. P. 63–65. (In Russ.)
10. Bondarenko I. F., Zharikov S. N., Zyrianov I. V., Shemenov V. G. *Drilling and blasting at kimberlite deposits of Yakutia*. Ekaterinburg: Institute of Mining UB RAS Publishing; 2017. (In Russ.)
11. Onederra I., Riihioja K. An alternative approach to determine the uniformity index of Rosin-Rammler based fragmentation models. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blast*. 2006. P. 193–199.
12. Nourian A., Moomivand H. Development of a new model to predict uniformity index of fragment size distribution based on the blasthole parameters and blastability index. *Journal of Mining Science*. 2020; 56: 47–58. Available from: doi: 10.1134/S1062739120016478
13. Sokolov I. V., Smirnov A. A., Rozhkov A. A. Technology of blasting of strong valuable ores with ring borehole pattern. *Journal of Mining Institute*. 2019; 237: 285–291. Available from: doi: 10.31897/PMI.2019.3.285
14. Sokolov I. V., Kornilkov S. V., Sashurin A. D., Kuz'min V. G., Shemiakin V. S. Formation of science and technology backup for introduction of integrated technology of highly valuable quartz mining and processing. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2014; 12: 44–49. (In Russ.)
15. Gorinov S. A. The efficiency of slab charges for intensely fractured ore breaking in underground conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1985; 7: 68–73. (In Russ.)
16. Savich I. N., Mustafin V. I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel face draw. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; S1: 419–429. (In Russ.)
17. Mijalkovski S., Despodov Z., Mirakovski D., Adjiski V. Methodology for optimization of coefficient for ore recovery in sublevel caving mining method. *Podzemni Radovi*. 2017; 30: 19–27. Available from: doi: 10.5937/podrad1730019

18. Smirnov A. A., Baranovskii K. V. Critical analysis of theoretical provisions on the production of ore under caved rocks. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use*. 2022; 3: 136–145. (In Russ.)
19. Pavlenko S. V., Savich I. N., Kotov A. A. Management of ore release under collapsed rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; S6: 11–20. (In Russ.)
20. Valiev N. G., Propp V. D., Kolesnikov A. A., Berkovich V. Kh., Shadrin D. M. Improving the technology of underground mining of polymetallic ores at the Korbalikhinsky mine of Siberia-Polymetals JSC. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 2: 36–47. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-1-36-47
21. Manzoor S., Gustafson A., Schunnesson H., Tariq M., Wettainen T. Rock fragmentation measurements in sublevel caving: field tests at LKAB's Malmberget mine. In: *Caving 2022: Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2022. P. 381–392. Available from: doi: 10.36487/ACG_repo/2205_26
22. Stazhevskii S. B. On the peculiarities of crushed rock flow when mining with the sublevel caving method. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1996; 5: 72–89. (In Russ.)
23. Rusin E. P., Stazhevskii S. B. Swedish version of sublevel caving ore mining system state-of-the-art and prospects. *Interexpo Geo-Sibir = Interexpo GEO-Siberia*. 2017; 2(2): 112–116. (In Russ.)
24. Dubynin N. G., Khramtsov V. F. *Ore drawing control at underground mining*. Novosibirsk: IM SB AS USSR Publishing; 1970. (In Russ.)
25. Stazhevskii S. B. On the second for of efflux of bulk materials at vertical vessels. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1985; 5: 3–16. (In Russ.)
26. Zhironkin A. F. *Studying the technology and mechanization of ore drawing at Ural iron-ore shafts: PhD in Eng. abstr. of diss. Sverdlovsk*; 1970. (In Russ.)
27. Zhang Z. X. Lost-ore mining – a supplementary mining method to sublevel caving. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2023; 168: 105420. Available from: doi: 10.1016/j.ijrmms.2023.105420
28. Melo F., Vivanco F., Fuentes C., Apablaza V. On drawbody shapes: from Bergmark-Ross to kinematic models. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2007; 44: 77–86. Available from: doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.010

Received 10 October 2023

Information about the authors:

Smirnov A. A. – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech910@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8949-1525>

Baranovskii K. V. – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: kartingist@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2572-166X>

Rozhkov A. A. – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: 69artem@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3007-1099>

Nikitin I. V. – researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining UB RAS. E-mail: geotech@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Для цитирования: Смирнов А. А., Барановский К. В., Рожков А. А., Никитин И. В. Определение рациональных параметров технологии с обрушением и торцовым выпуском руды в условиях северных регионов России // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 6. С. 27–37. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-27-37

For citation: Smirnov A. A., Baranovskii K. V., Rozhkov A. A., Nikitin I. V. Determining the rational parameters of ore caving and frontal draw in the conditions of Russia's northern regions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 6: 27–37 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-27-37