

Снижение ущерба от переизмельчения руды за счет создания горнотехнических условий для эффективного применения автоматизированного технологического оборудования на подземных рудниках

А.А. Рожков ✉, К.В. Барановский

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ 69artem@bk.ru

Резюме: Одной из важных проблем освоения недр при подземной разработке месторождений минерального сырья является комплексное снижение показателей эффективности и безопасности функционирования горнотехнических систем вследствие ущерба, вызываемого переизмельчением руды в процессе выемки полезных ископаемых. Применительно к рассматриваемой проблеме переизмельчения руды и ее отрицательных последствий актуальным является рассмотрение технологических способов снижения комплексного ущерба путем автоматизации геотехнологических процессов и целенаправленного формирования горнотехнических условий, позволяющих эффективно реализовать потенциал нового технологического уклада. Снижение прямого ущерба при добыче металлических руд в первую очередь связано с целенаправленным изменением горнотехнических условий, которые позволяют эффективно применять самоходное оборудование с дистанционным управлением не только при выемке основных запасов, но и при извлечении обогащенной рудной мелочи из очистного пространства. Основными преобразуемыми конструктивными элементами очистного пространства являются подстилающая поверхность и кровля выработки. Степень неровности подстилающей поверхности и угол ее наклона в наибольшей степени влияют на эффективность зачистки рудной мелочи, а состояние кровли определяют условия работы самоходного оборудования в очистном пространстве. В исследовании на примере добычи вкрапленных медно-никелевых руд выявлена зависимость потерь металла от мощности рудного тела и высоты слоя теряемой руды. Приведена систематизация видов ущерба от переизмельчения руды. Представлены технологические решения по снижению ущерба от переизмельчения руды с использованием дистанционно управляемого оборудования и потенциальные эффекты от их внедрения.

Ключевые слова: горнотехнические условия, переизмельчение руды, прямой ущерб, косвенный ущерб, рудная мелочь, автоматизация технологических процессов, рудосортировка

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00410-25-00. Гр. №1022040200004-9-1.5.1. Тема 1 (2025–2027).

Для цитирования: Рожков А.А., Барановский К.В. Снижение ущерба от переизмельчения руды за счет создания горнотехнических условий для эффективного применения автоматизированного технологического оборудования на подземных рудниках. *Горная промышленность*. 2025;(5S):100–106. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-100-106>

Reducing damage from ore overcrushing by creating mining conditions for efficient application of automated process equipment in underground mines

A.A. Rozhkov ✉, K.V. Baranovsky

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ 69artem@bk.ru

Abstract: One of the important problems in underground mining of mineral deposits is an overall decrease in the efficiency and safety indicators of mining systems due to the damage caused by ore overcrushing when mining the mineral reserves. With regard to the considered problem of ore overcrushing and its negative consequences, a topical issue is the consideration of technological methods for reducing complex damage based on automation of geotechnological processes and the targeted

formation of mining conditions that allow for an efficient unlocking of the potential offered by the new technological mode. Reducing direct damage when mining metal ores is primarily associated with a targeted change in the mining conditions that would make it possible to efficiently use the remotely controlled mobile equipment not only for mining the main ore reserves, but also for removing available ore fines from the stope area. The main transformable elements of the stope area are the floor and the roof. The degree of the floor roughness and its angle of inclination have the greatest impact on the efficiency of removing the ore fines, while the condition of the roof determines the possibility to use mobile equipment in the stope area.

The study revealed a dependence of the metal loss on the thickness of the ore body and the height of the lost ore layer using the case of mining impregnated copper-nickel ores. The types of damage caused by ore overcrushing are systematized. The paper presents technological solutions to reduce the damage of ore overcrushing using remotely controlled equipment as well as the potential effects of their implementation.

Keywords: mining conditions, ore overcrushing, direct damage, indirect damage, ore fines, automation of technological processes, ore sorting

Acknowledgements: The research was performed within the framework of State Contract No. 075-00410-25-00, Topic 1 (2025–2027).

For citation: Rozhkov A.A., Baranovsky K.V. Reducing damage from ore overcrushing by creating mining conditions for efficient application of automated process equipment in underground mines. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):100–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-100-106>

Введение

Одной из важных проблем освоения недр при подземной разработке месторождений минерального сырья является комплексное снижение показателей эффективности и обеспечение безопасности функционирования горнотехнических систем вследствие снижения ущерба, вызываемого переизмельчением руды в процессе выемки рудных запасов [1–3]. Данный ущерб зависит от типа добываемого минерального сырья (металлическое или неметаллическое), инициирующего события (первичный или вторичный ущерб) и характера негативного воздействия (прямой или косвенный ущерб). Виды ущерба подразделяются на четыре основные группы: снижение полноты извлечения запасов недр; снижение экономической эффективности функционирования горнотехнической системы; снижение интенсивности освоения участка недр; снижение безопасности и экологичности освоения участка недр (табл. 1). При добыче металлического сырья основные виды данного ущерба выражаются в потерях обогащенной рудной мелочи, обусловленных гранулометрической сегрегацией в очистном пространстве и осаждением мелких фракций с повышенным содержанием металлов, дополнительными затратами, снижением производительности и ухудшением условий безопасности горных работ при извлечении основной части запасов выемочной единицы. При добыче неметаллических полезных ископаемых основной ущерб от переизмельчения обуславливается строгими требованиями к минимальной кондиционной крупности кусков или сохранности кристаллов.

В контексте развития и совершенствования структуры горнотехнических систем во многом определяющую роль играет автоматизация технологических процессов за счет полной или частичной роботизации применяемого оборудования, цифровизации систем управления, использования программного обеспечения, позволяющего оперативно планировать развитие горных работ с учетом постоянно изменяющихся условий и актуализации информации них [4; 5].

Применительно к рассматриваемой проблеме переизмельчения руды и его отрицательных последствий, актуальным вопросом является рассмотрение технологических способов снижения комплексного ущерба на основе

автоматизации геотехнологических процессов и целенаправленного формирования горнотехнических условий, позволяющих эффективно реализовать потенциал нового технологического уклада [6; 7].

Материалы и методы

Основным способом автоматизации процессов очистной выемки в настоящее время является применение погрузочно-доставочных машин (ПДМ) и другого самоходного оборудования (СО) с дистанционным управлением (ДУ). При этом происходит постепенное сокращение роли оператора от полного управления одной единицей оборудования до наблюдательного и корректирующего контроля за комплексом СО, работающего по принципу оптимизированного автоматического перемещения по запрограммированному маршруту [8]. Вместе с тем в ряде случаев, складывающиеся горнотехнические условия не способствовали значительному росту эффективности горных работ в части ущерба от переизмельчения руды за счет применения СО с ДУ. Например, при отработке пологих и наклонных рудных тел малой и средней мощности, в частности, при системах с обрушением и торцовым выпуском руды, камерных системах с траншейным днищем и площадным выпуском руды, системах с магазинированием руды [9]. В таких условиях область работы СО ограничена шириной выработки выпуска руды, что не позволяет в полной мере реализовать потенциал дистанционного автоматизированного управления, поскольку не происходит воздействия на источники ущерба от переизмельчения руды.

При традиционной технологии добычи вкрапленных медно-никелевых руд с обрушением руды и налегающих пород в силу сегрегационных процессов обогащенная рудная мелочь скапливается в различных неровностях откосов породной траншеи, после чего ее доизвлечение в условиях некрутого падения рудных тел становится практически невозможным. Принимая допущение, что содержание переизмельченных фракций в общих потерях отбитой руды при данной технологии пропорционально выходу переизмельчаемой руды при отбойке, при коэффициенте обогащения $k_{об}=1,5$ [10] и актуальной извлекаемой ценности, получены следующие зависимости (рис. 1).

Таблица 1
Систематизация видов ущерба от переизмельчения руды

Table 1
Systematization of the damage types from ore overbreaking

Классы и группы ущерба от переизмельчения руды		Тип добываемых руд				
		Металлические руды		Неметаллические руды		
		Условия применения мероприятий по снижению ущерба				
		без применения (первичный ущерб)	с применением (вторичный ущерб)	без применения (первичный ущерб)	с применением (вторичный ущерб)	
		Основные виды ущерба от переизмельчения руды				
I. Прямой ущерб	1. Снижение полноты извлечения запасов недр	Значительные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве	Частичные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве	Значительные потери руды некондиционной крупности	Частичные потери руды некондиционной крупности	
		Повышение потерь полезного компонента в просыпи при погрузке и при транспортировании		Разрушение значительной части кристаллов	Частичное разрушение кристаллов	
		Потери и разубоживание руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска	Потери рудной мелочи в результате выноса пульпы из очистного пространства при гидрозачистке блока	Повышение степени засорения мелких фракций вредными примесями	Засорение мелких фракций вредными примесями	
		Потери полезного компонента вследствие кольматации при подземном выщелачивании				
	2. Снижение экономической эффективности	Снижение извлекаемой ценности добытой руды	Затраты на поддержание очистного пространства после выемки основных запасов	Значительное снижение сорта и категории ценности сырья	Частичное снижение сорта и категории ценности сырья	
		Ущерб от потерь обогащенной металлом руды	Затраты на проведение дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи	Затраты на выпуск, доставку и транспортирование некондиционной руды	Затраты на проведение подготовительных мероприятий	
		Разубоживание руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска		Удорожание процессов переработки сырья		
	II. Косвенный ущерб	3. Снижение интенсивности освоения участка недр	Повышение степени слеживаемости рудной массы	Необходимость поддержания очистного пространства после выемки основных запасов	Затраты времени на выпуск, доставку и транспортирование некондиционной руды	Увеличение времени на проведение подготовительных мероприятий
			Повышение вероятности и скорости смерзания рудной массы	Затраты времени на осуществление дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи	Усложнение процессов переработки сырья	Переход на селективные методы ведения очистной выемки
			Непроизводительная работа оборудования при выпуске, доставке, транспортировании разубоженной руды	Повышение выхода негабарита		
4. Снижение безопасности и экологичности освоения недр		Повышение риска самовозгорания рудной массы	Низкая технологичность (кустарность) дополнительных мероприятий	Высокая запыленность рудничной атмосферы	Снижение доли механизации процессов очистной выемки	
			Нахождение людей в очистном пространстве			
		Высокая запыленность рудничной атмосферы	Увеличение количества стадий процесса очистной выемки в техногенно-нарушенных условиях	Пыление складов некондиционной руды на поверхности	Увеличение количества стадий процесса очистной выемки в техногенно-нарушенных условиях	
		Повышение риска взрывов сульфидной пыли	Снижение устойчивости элементов конструкции при проведении дополнительных взрывных работ	Изъятие земель под размещение некондиционной руды		

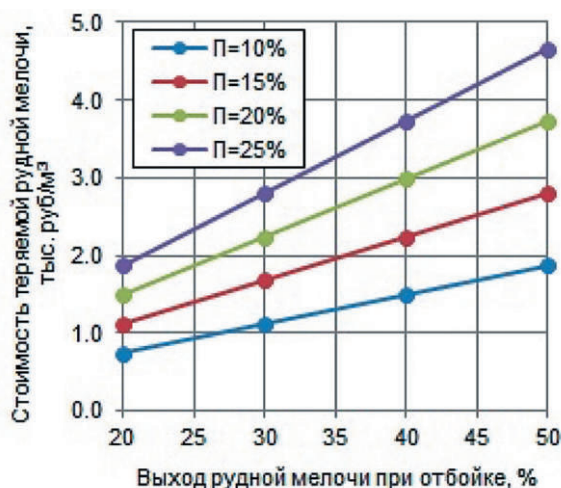


Рис. 1
Зависимости стоимости теряемой рудной мелочи при потерях $P = 10, 15, 20, 25\%$ от выхода переизмельченных фракций при отбойке и общего уровня потерь при системе разработки с обрушением

Fig. 1
Dependences of the cost of lost ore fines with the losses of 10, 15, 20, 25% on the production of the overcrushed fractions when stopping and the overall level of losses in a caving mining system

В зависимости от производственной мощности рудника и геометрических параметров выемочных единиц при такой технологии ущерб от потерь обогащенной рудной мелочи может составлять до нескольких сотен миллионов рублей ежегодно.

При переходе к камерной или слоевой выемке руды для расчета потерь металла в рудной мелочи Прмм необходимо учитывать определенное процентное содержание крупных и негабаритных кусков в отбитой рудной массе, коэффициент обогащения мелких фракций руды, степень разрыхления и геометрические параметры теряемого слоя, %,

$$П_{\text{М}}^{\text{РМ}} = 100 \cdot \frac{h_{\text{сл}} S_{\text{п}} \frac{\gamma_{\text{р}}}{K_{\text{р}}} [1 - (\eta_{\text{кр}} + \eta_{\text{нг}})] c_{\text{б}} k_{\text{об}} k_{\text{нс}} k_{\text{нп}}}{B_{\text{бл}} c_{\text{б}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{сл}}$ – высота слоя отбитой руды, м; $S_{\text{п}}$ – площадь подстилающей поверхности, м²; $K_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления, доли ед.; $\gamma_{\text{р}}$ – плотность руды в массиве, т/м³; $\eta_{\text{кр}}$ – содержание кусков кондиционной крупности, доли ед.; $\eta_{\text{нг}}$ – содержание негабаритных кусков, доли ед.; $c_{\text{б}}$ – среднее содержание металла по блоку, кг/т; $k_{\text{об}}$ – коэффициент обогащения рудной мелочи, доли ед.; $k_{\text{нс}}$ – коэффициент неравномерности слоя руды, доли ед.; $k_{\text{нп}}$ – коэффициент неровности почвы, доли ед.; $B_{\text{бл}}$ – балансовые запасы блока, т.

Неравномерность слоя теряемой руды определяется его переменной высотой по длине и ширине выработки. При расчетах эта характеристика учитывается соответствующим коэффициентом. В рассматриваемых условиях принимаем $k_{\text{нс}} \approx 0,7$ – отношение средней высоты слоя к его максимальной высоте. Для количественной оценки неровности почвы очистного пространства необходимо учесть форму и объем неровностей. Известно, что форма неровностей чаще всего представляет собой воронки или борозды, а их глубина может составлять до 0,5 м и более [11]. Данный параметр характеризуется коэффициентом, учитывающим увеличение объема теряемой руды, доли ед.,

$$k_{\text{нп}} = \frac{h_{\text{сл}} + (0,33h_{\text{н}})}{h_{\text{сл}}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{н}}$ – средняя глубина воронкообразных неровностей почвы, м.

Учитывая особенности отгрузки руды при помощи ПДМ с ДУ, высоту слоя теряемой руды, механически уплотняемой по мере работы СО, можно прогнозировать до 0,5 м (рис. 2).

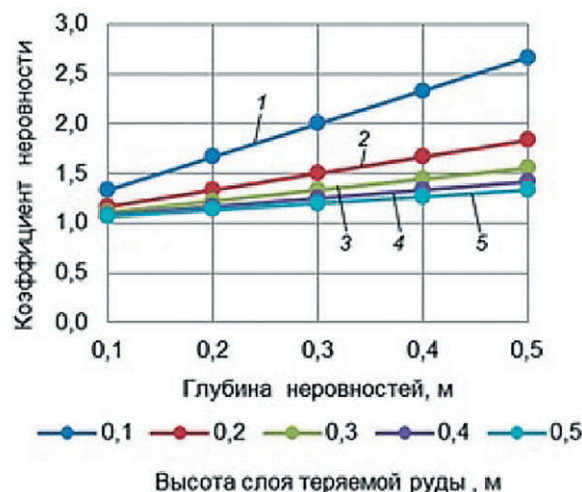


Рис. 2
Коэффициент неровности почвы в зависимости от глубины неровностей при различной высоте слоя отбитой руды: 1 – 0,1 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,3 м; 4 – 0,4 м; 5 – 0,5 м

Fig. 2
The floor roughness coefficient depending on the depth of roughness at different heights of the muck pile: 1 – 0.1 m; 2 – 0.2 m; 3 – 0.3 m; 4 – 0.4 m; 5 – 0.5 m

Результаты и их обсуждение

С учетом влияния рассмотренных факторов и коэффициента обогащения мелких фракций $k_{\text{об}} = 1,5$ [10] на примере добычи вкрапленных медно-никелевых руд выявлена зависимость потерь металла от мощности рудного тела и высоты слоя теряемой руды (рис. 3).

Снижение прямого ущерба при добыче полиметаллических руд в первую очередь связано с целенаправленным изменением горнотехнических условий, которые бы позволили эффективно применять СО с ДУ не только при выемке основной части запасов очистной выработки, но и в части извлечения обогащенной рудной мелочи. Основными преобразуемыми элементами системы разработки являются подстилающая поверхность и кровля выработки. Степень неровности подстилающей поверхности и угол ее наклона в наибольшей степени влияют на эффективность зачистки рудной мелочи, а состояние кровли определяет возможность нахождения СО в очистном пространстве.

Для формирования ровных подстилающих поверхностей в очистном пространстве целесообразно применять методы контурного взрывания скважинных зарядов при формировании откосов траншей и оптимизации параметров перебура скважин при оформлении поверхности плоских днищ блоков. В соответствии с ранее предложенной систематизацией способов снижения ущерба от переизмельчения руды [1] такой подход к формированию благоприятных

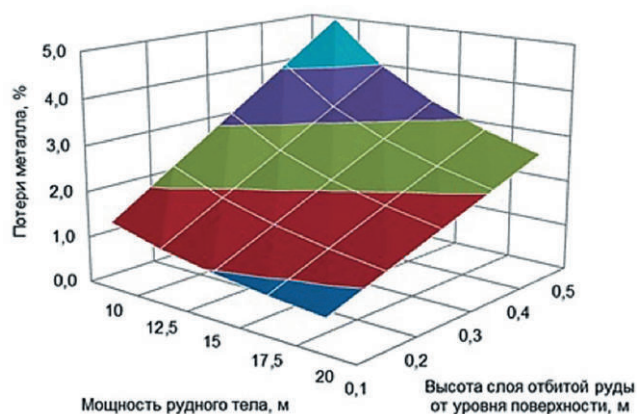


Рис. 3
Зависимость потерь металла в рудной мелочи от мощности рудного тела при различной высоте слоя теряемой руды

Fig. 3
Dependence of the metal losses in ore fines on the thickness of the ore body at different heights of the lost ore layer

условий для работы СО с ДУ можно охарактеризовать как комбинированный (по порядку осуществления относительно цикла очистной выемки), конструктивно-механический (формирование элементов горной конструкции с параметрами, обеспечивающими повышение эффективности работы механизированного оборудования).

При отработке маломощных месторождений ценных руд характерной особенностью, помимо потерь обогащенной рудной мелочи, является значительное разубоживание рудной массы от боковых вмещающих пород. При добыче неметаллического сырья переизмельчение оказывает значительное влияние на эффективность подземной гео-

технологии, когда, помимо снижения ценности добытого сырья, влечет за собой непроизводительные затраты на выпуск, доставку, транспортирование и переработку рудной массы, прямо пропорциональные выходу некондиционной рудной мелочи при отбойке [12]. И в первом, и во втором случаях такое разубоживание влияет тем сильнее, чем на большее расстояние руда транспортируется от забоя. Основным направлением снижения данных видов ущерба является применение систем автоматизированной рудосортировки для отделения пустых пород из рудной массы в непосредственной близости от очистных забоев [13]. Эффективность работы таких систем возможно повысить за счет придания контрастных свойств рудо-породной массе на стадии очистной выемки. В соответствии с ранее предложенной систематизацией способов снижения ущерба от переизмельчения руды [1] такой подход к формированию благоприятных горнотехнических условий можно охарактеризовать как превентивный, селективно-буровзрывной (крупное дробление руды и переизмельчение породы для их последующего разделения по гранулометрическому составу). В случае добычи неметаллических полезных ископаемых отделяется некондиционная мелочь, в случае маломощных месторождений ценных руд – предотвращается переизмельчение рудного тела при отбойке, а отделяемая породная мелочь подвергается грохочению с выделением мельчайших фракций, которые оперативно опробуются на содержание ценных компонентов из зон минерализации вмещающих пород.

В табл. 2 представлены частные примеры применения указанного подхода к снижению ущерба от переизмельчения руды на основе создания горнотехнических условий для эффективного применения автоматизированного технологического оборудования.

Таблица 2
Технологические решения по снижению ущерба от переизмельчения руды с использованием дистанционно управляемого оборудования

Table 2
Technological solutions to reduce damage from ore overcrushing using remotely controlled equipment

Объект и его основные условия	Технологические решения	Потенциальный эффект
Медно-никелевое месторождение вкрапленных руд (10–20 м, 8–10°)	Переход на камерную выемку с плоским днищем и отбойкой руды нисходящими веерами скважин с перебором и последующей отработкой междукammerных целиков с обрушением на предварительно оформленные методом контурного взрывания откосы породной траншеи	Создание горнотехнических условий для качественной зачистки почвы камер ПДМ с ДУ, повышение эффективности выпуска мелких фракций под обрушенными породами
Медноколчеданное месторождение (7–10 м, 15–40°)	Предварительное оформление методом контурного взрывания откосов породной траншеи и отбойка руды на временное компенсационное пространство	Создание горнотехнических условий для заезда ПДМ с ДУ во временно сохраняемое очистное пространство и повышение эффективности выпуска мелких фракций до его погашения
Медноколчеданное месторождение (3–5 м, 25–40°)	Переход на камерную выемку с оставлением неизвлекаемых целиков	Создание условий для работы ПДМ с ДУ в траншейном штреке и применения для зачистки откоса камеры бульдозера с ДУ
Золоторудные месторождения (0,5–1,2 м, 70–90°)	Переход на восходящую слоевую выемку с сухой закладкой и отбойку с крупным дроблением рудного тела и переизмельчением боковых минерализованных пород для внутрирудничной рудосортировки	Создание горнотехнических условий для работы СО с ДУ в очистном пространстве, минимизация возможных потерь рудной мелочи, извлечение полезного компонента из зон минерализации, утилизация отходов в очистном пространстве и снижение затрат на транспортирование рудной массы
Кварцевое месторождение (8–12 м, 30°)	Применение систем внутрирудничной рудосортировки для отделения некондиционных фракций и пустых пород	Создание горнотехнических условий для использования ПДМ с ДУ для закладки камер, снижение затрат на транспортирование и глубокое обогащение

Поскольку применение ПДМ с ДУ позволяет безопасно заезжать в очистное пространство, целесообразно максимально расширять область применения камерных систем и систем с сухой закладкой, в качестве которой перспективно использовать отходы рудосортировки [14].

В условиях пологих месторождений предпочтительно формирование плоских днищ для качественной зачистки подстилающей поверхности ПДМ с ДУ. В условиях наклонных рудных тел необходимо создавать максимально гладкие поверхности откоса на лежащем боку, что минимизирует осаждение мелких фракций или облегчает их зачистку с помощью специальных бульдозеров с ДУ [15], доставляющих мелкие фракции по наклонной поверхности в зону работы ПДМ с ДУ в траншейном штреке [16]. При данном варианте технологии отказ от площадного выпуска руды в пользу торцового позволяет не только снизить удельный объем подготовительно-нарезных работ, но и ликвидировать потери руды между погрузочными заездами.

Заключение

Повышение полноты извлечения запасов месторождений полезных ископаемых достигается за счет снижения потерь обогащенной рудной мелочи путем создания благоприятных горнотехнических условий для эффективной зачистки днища камер ПДМ с ДУ с минимизацией последствий сегрегационно-концентрационных процессов. Повышение экономической эффективности функционирования горнотехнической системы достигается за счет увеличения извлекаемой ценности добытой руды, минимизации затрат на дополнительные мероприятия по снижению ущерба от переизмельчения полезных ископаемых и снижения непроизводительных затрат на работу оборудования. Обеспечение необходимой интенсивности и порядка выемки запасов руды достигается за счет максимального совмещения дополнительных мероприятий с основными процессами очистной выемки при подготовке, отбойке и выпуске руды. Безопасность обеспечивается за счет применения СО с ДУ без включения дополнительных операций в цикл очистной выемки, требующих применения ручного труда.

Список литературы / References

1. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В. Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений. *Горная промышленность*. 2023;(5):78–82. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-78-82>
Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovsky K.V. Parameterization of mining technology to reduce losses from undue pulverization of ores in underground mining. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):78–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-78-82>
2. Xingwana L. Monitoring ore loss and dilution for mine-to-mill integration in deep gold mines: A survey-based investigation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2016;116(2):149–160. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6>
3. Dominy S.C., Glass H.J., Minnitt R.C.A. Sampling broken ore residues in underground gold workings: implications for reconciliation and lost revenue. *Minerals*. 2022;12(6):667. <https://doi.org/10.3390/min12060667>
4. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников. *Горный журнал*. 2017;(11):52–59. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(11):52–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
5. Яковлев В.Л. Методологические основы стратегии инновационного развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):6–18. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_6
Yakovlev V.L. Methodological framework of the strategy for innovative development of mining systems for deep-seated mineral deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):6–18. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_6
6. Рыльникова М.В., Макеев М.А., Кадочников М.В., Клебанов Д.А. Большие данные для оптимизации работы погрузочной техники и автотранспорта на горных работах. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(4):343–354.
Rylnikova M.V., Makeev M.A., Kadonichkov M.V., Klebanov D.A. Leverage of big data to optimize the operation of loading equipment and vehicles in surface mining. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(4):343–354. (In Russ.)
7. Хажиев В.А. Концепция развития системы эксплуатации технологического комплекса горнодобывающего предприятия. *Горное оборудование и электромеханика*. 2022;(2):3–13. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-3-13>
Khazhiev V.A. The concept of development of the operation system of the technological complex of the mining enterprise. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022;(2):3–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-2-3-13>

8. Павленко С.В., Котов А.А. Система дистанционного управления погрузочно-доставочной машиной при поэтажном 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.)
9. Zhang Z.-X. Lost-ore mining – A supplementary mining method to sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023;168:105420. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105420>
10. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А. Влияние класса крупности медно-никелевого рудного сырья и его изменчивости на показатели обогащения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(3):104–107.
Lomonosov G.G., Turtigina N.A. Influence of coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the beneficiation indication. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(3):104–107. (In Russ.)
11. Глотов В.В., Пахалуев Б.Г. Оптимизация расстояния между стенками желобов при гидрозачистке выемочных блоков. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2016;22(4):4–9.
Glotov V.V., Pakhaluev B.G. Optimization of distance between the walls of the trenches during excavation hydrotreating units. *Transbaikal State University Journal*. 2016;22(4):4–9. (In Russ.)
12. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А. Результаты экспериментальных исследований подземной добычи высокоценного кварца в условиях Кыштымского рудника. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(1):97–106. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180112>
Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Y.G., Baranovsky K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A. Experimental investigation of underground mining of high-grade quarts in Kyshtym mine. *Journal of Mining Science*. 2018;54(1):85–93. <https://doi.org/10.1134/S1062739118013389>
13. 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):70–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-70-75>
Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Ovcharenko O.V. Prospects for the development of underground ore mining geotechnologies at the Talnakh and Oktyabrskoye deep mines. *Russian Mining Industry*. 2021;(5):70–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-5-70-75>
14. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium-thick orebody on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*. 2020;15(5):e0232640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232640>
15. Ломоносов Г.Г., Шангин С.С., Юсимов Б.В. Повышение извлечения мелких фракций золотосодержащих руд при подземной разработке маломощных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S27):12–18.
Lomonosov G.G., Shangin S.S., Yusimov B.V. Modern integrated technical equipping of cleaning work during the development of low-power gold fields. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(S27):12–18. (In Russ.)
16. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А. Модернизация системы разработки маломощного месторождения богатых медноколчеданных руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(3):444–453.
Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. Modernization of the mining system of small deposits of rich copper pyrite ores. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(3):444–453. (In Russ.)

Информация об авторах

Рожков Артём Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: 69artem@bk.ru

Барановский Кирилл Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Information about the authors

Artem A. Rozhkov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: 69artem@bk.ru

Kirill V. Baranovsky – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Underground Geotechnology, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.09.2025

Поступила после рецензирования: 09.10.2025

Принята к публикации: 16.10.2025

Article info

Received: 05.09.2025

Revised: 09.10.2025

Accepted: 16.10.2025