

УДК 622.013.364

Рожков Артём Андреевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: 69artem@bk.ru

НАПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО УЩЕРБА ОТ ПЕРЕИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД ПРИ СИСТЕМАХ РАЗРАБОТКИ С ОБРУШЕНИЕМ*

Аннотация:

В результате проведенных исследований установлено, что при системах разработки с обрушением руд и вмещающих пород, в связи с переизмельчением при отбойке рудного массива и последующими сегрегационно-концентрационными процессами при выпуске, наносится значительный ущерб, обуславливающий снижение эффективности функционирования горнотехнической системы. Результаты оценки экономического ущерба от потерь обогащенных металлом мелких фракций позволяют говорить о целесообразности разработки и реализации технических решений, которые позволили бы повысить полноту извлечения запасов недр. Определенные в настоящей работе направления преобразования элементов горнотехнической системы для снижения ущерба от переизмельчения руды являются основой для разработки и совершенствования конструкции системы разработки, геотехнологических процессов очистной выемки и применяемого технологического оборудования. Технические решения по снижению отрицательных последствий переизмельчения должны осуществляться на принципах синергии с технологией извлечения основной части запасов. Изменения в структуре горнотехнической системы не должны приводить к значительному увеличению объемов проведения подготовительно-нарезных выработок, продолжительности отработки выемочной единицы и усложнению технологических процессов очистной выемки, тем самым обеспечивая необходимую эффективность, интенсивность и безопасность подземной геотехнологии.

Ключевые слова: горнотехническая система, системы разработки с обрушением, потери, ущерб, переизмельчение руды, рудная мелочь.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.032

Rozhkov Artem A.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining UB RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: 69artem@bk.ru

DIRECTIONS OF TRANSFORMATION OF MINING SYSTEM TO REDUCE COMPREHENSIVE DAMAGE FROM ORE OVERGRINDING IN CAVING WITH DEVELOPMENT SYSTEMS WITH COLLAPSING

Abstract:

The conducted studies have shown that in the case of caving systems of ore and host rocks, overgrinding during breaking of the ore massif and subsequent segregation-concentration processes during ore drawing cause significant damage to the efficiency of the mining-engineering system. An assessment of the economic damage from the loss of fine fractions enriched with metal allows us to speak about the feasibility of developing and implementing technical solutions that would increase the completeness of subsoil reserves extraction. The directions of transformation of the mining-engineering system elements to reduce damage from overgrinding of ore, determined in this work, are the basis for developing and improving the design of mining system, geotechnological processes of stoping and the applied technological equipment. Technical solutions to reduce the negative consequences of overgrinding should be implemented on the principles of synergy with the technology of extracting the main part of the reserves. Changes in the structure of the mining-engineering system should not lead to a significant increase in the volume of preparatory and cutting workings, the duration of the extraction unit mining and the complication of the technological processes of stoping, thereby ensuring the necessary efficiency, intensity and safety of underground geotechnology.

Key words: mining-engineering system, caving systems, losses, damage, ore overgrinding, ore fines.

* Исследования выполнены в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

Введение

Одной из проблем освоения недр при подземной разработке месторождений твердых полезных ископаемых является ущерб, вызываемый переизмельчением руды в процессе выемки запасов, проявляющийся в комплексном снижении показателей технико-экономической эффективности и безопасности функционирования горнотехнических систем (ГТС) [1 – 3].

Основная часть известных решений и проводимых ранее изысканий по снижению ущерба от переизмельчения руды направлена на совершенствование технологий отбойки и последующую зачистку почвы выработанного пространства при системах разработки с естественным и искусственным поддержанием очистного пространства [4].

Современный этап эксплуатации месторождений характеризуется постоянным усложнением горно-геологических условий и необходимостью интенсификации процессов добычи в связи со снижением содержаний полезных компонентов и сложной геомеханической обстановкой [5, 6]. Это предопределяет увеличение доли применения систем разработки с обрушением, в том числе при отработке целиков. В таких условиях известные решения малоэффективны или неосуществимы, а отбойка руды в зажатой среде ограничивает область оптимизации технологии и параметров буровзрывных работ [7, 8].

Таким образом, разработка направлений преобразования элементов ГТС по снижению ущерба от переизмельчения руд, обеспечивающих технологическое развитие и расширение минерально-сырьевой базы подземных рудников при системах разработки с обрушением руды и вмещающих пород, является актуальной научно-технической задачей.

Материалы и методы исследований

Для большинства металлических руд характерно повышенное содержание полезного компонента в мелких фракциях разрушенной взрывом горной породы [9]. Главной причиной переизмельчения руды являются буровзрывные работы при очистной выемке [10, 11]. При системах разработки с обрушением руды и вмещающих пород данный фактор усиливается вследствие отбойки в зажатой среде. В процессе выпуска руды при любом классе применяемых систем разработки вместе с движением рудной массы происходят сегрегационные процессы. Накопление более тяжелых рудных минералов в мельчайших фракциях происходит в силу их большего удельного веса относительно вмещающей породы. Под действием гравитации такие фракции проникают между более крупными кусками руды [12].

Более крупные фракции, также относящиеся к категории рудной мелочи (менее 50 мм), подвергаются гранулометрической сегрегации, проникая в пустоты между крупными кусками в процессе перемещения сыпучей среды по очистному пространству [13]. Из теории и практики разработки месторождений и формирования насыпных горнотехнических сооружений известно, что чем меньше и тяжелее фракция горной породы, тем быстрее она осаждается при движении по наклонной плоскости, вследствие чего происходит самосортировка горной массы по гранулометрическому составу [14].

Осаждение обогащенных фракций в очистном пространстве приводит к их концентрации в значительных количествах и последующим потерям ценной руды [15]. Вместе с тем переизмельчение рудной массы приводит также к разубоживанию добытой руды. Повышение содержания полезного компонента в мелких фракциях происходит за счет его снижения в кусках крупных фракций [16]. Применительно к системам разработки с обрушением, при мелкофракционном составе рудной массы также происходит сужение фигуры выпуска или «трубообразование», что приводит к раннему разубоживанию от внедрения налегающих обрушенных пород и повышенным потерям отбитой руды в краевых частях выемочной единицы [17, 18].

В основе настоящих исследований лежит методический подход к снижению ущерба как комплексной проблеме [19 – 25].

Применительно к системам разработки с обрушением при добыче металлических руд выделены основные виды ущерба (табл. 1).

Таблица 1

Систематизация видов ущерба от переизмельчения металлических руд при системах разработки с обрушением

Вид ущерба		Форма проявления ущерба	
По характеру воздействия	По направлению воздействия	Традиционная технология (без применения мероприятий по снижению ущерба)	Модернизированная технология (с применением мероприятий по снижению ущерба)
Прямой ущерб	1. Геологический ущерб	Значительные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве	Частичные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве
		Потери руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска	
		Повышение потерь полезного компонента в просыпи при погрузке, транспортировании и складировании	
	2. Экономический ущерб	Ущерб от потерь обогащенной металлом руды	Капитальные и эксплуатационные затраты на проведение дополнительных мероприятий
		Снижение извлекаемой ценности основных запасов добытой руды вследствие сегрегационно-концентрационных процессов	Частичное снижение извлекаемой ценности основных запасов добытой руды
		Недополученная выгода от разубоживания руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска	Дополнительные затраты на поддержание выработок выпуска и доставки руды
		Дополнительные затраты на приведение рабочих зон в безопасное состояние по пожароопасности и пылевому фактору	
	3. Технологический ущерб	Повышение степени слеживаемости рудной массы	Затраты времени на осуществление дополнительных мероприятий
		Повышение вероятности и скорости смерзания рудной массы	Усложнение процессов цикла очистной выемки
		Непроизводительная работа оборудования при выпуске, доставке, транспортировании разубоженной руды	Повышение выхода негабарита
			Увеличение продолжительности цикла крепления выработок выпуска и доставки руды
		Возможные остановки процесса очистной выемки вследствие самовозгорания рудной массы	Низкая технологичность (кустарность) дополнительных мероприятий
		Повышение риска взрывов сульфидной пыли	Увеличение количества стадий процесса очистной выемки в техногенно-нарушенных условиях
Косвенный ущерб	4. Социальный ущерб	Повышение риска отравления токсичными газами в результате самовозгорания рудной массы	Повышение риска травмирования вследствие увеличения доли ручного труда
		Повышение риска заболеваний органов дыхания вследствие высокой запыленности рудничной атмосферы	
		Повышение риска травмирования в результате взрывов сульфидной пыли	Повышение риска травмирования вследствие нахождения в очистном пространстве и техногенно-нарушенных условиях

Таким образом, основными причинами проявления прямого ущерба в последовательном порядке являются:

- переизмельчение при отделении руды от массива;
- сегрегационные процессы при выпуске руды;
- концентрационные процессы в очистном пространстве;
- снижение показателей полноты и качества добытой руды.

Проявление косвенного ущерба обусловлено в основном повышенными рисками нанесения вреда здоровью персонала.

Поскольку полностью предотвратить или ликвидировать все отрицательные последствия переизмельчения руды невозможно, преобразования элементов ГТС для снижения ущерба должны быть сбалансированы с учетом его вида и значимости.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве характерного объекта для укрупненной оценки экономического ущерба нами принят рудник «Заполярный», осваивающий месторождение комплексных вкрапленных медно-никелевых руд, представленное пологой залежью средней мощности, отработка которого в настоящее время осуществляется системой разработки с обрушением.

Для условий данного месторождения канд. техн. наук Н.А. Туртыгиной установлено [26], что содержание Cu и Ni в мелких фракциях руды в 1,5 – 2 и более раз выше, чем в крупных фракциях.

Для оценки ущерба было исследовано влияние на извлекаемую ценность добытой руды показателя потерь по системе разработки. Учитывался комплексный состав руд месторождения и биржевые показатели стоимости металлов на текущий период (с февраля по июль 2025 г.) (рис. 1).

Поскольку при технологии с обрушением руды и налегающих пород отбойка производится послойно, откос траншеи формируется крайними скважинами веера одновременно с разрушением отбиваемого слоя [27]. При этом на откосе формируются неровности, обусловленные характером действия взрыва скважинного заряда в краевой части веера при отбойке на зажимающую среду [28]. В силу сегрегационно-концентрационных процессов, часть мелких фракций скапливается в данных неровностях, а также в краевых частях потока выпускаемой руды и рудных гребнях.

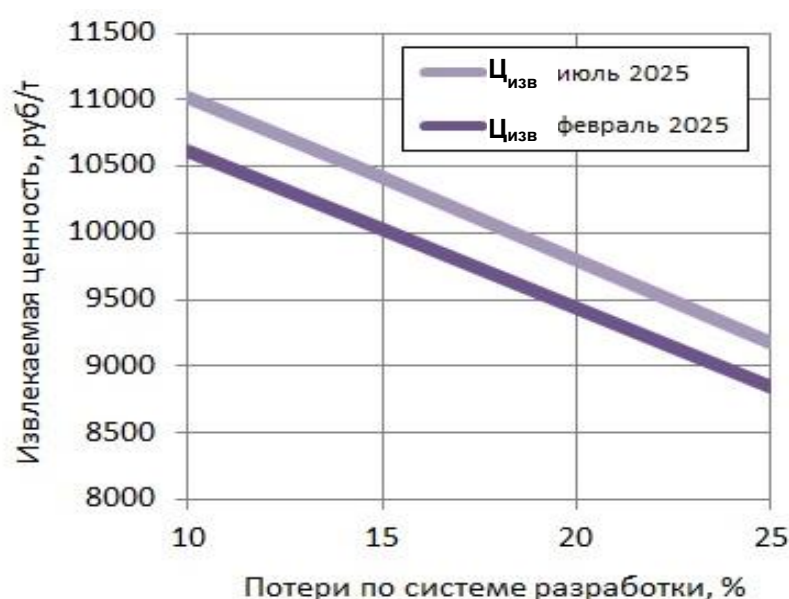


Рис. 1. Зависимость извлекаемой ценности руды от показателя потерь и изменения биржевых цен металлов

Для оценки ущерба нами приняты коэффициент обогащенности рудной мелочи 1,5 и допущение, что содержание переизмельченных фракций в общих потерях отбитой руды при данной технологии пропорционально выходу рудной мелочи при отбойке (рис. 2).

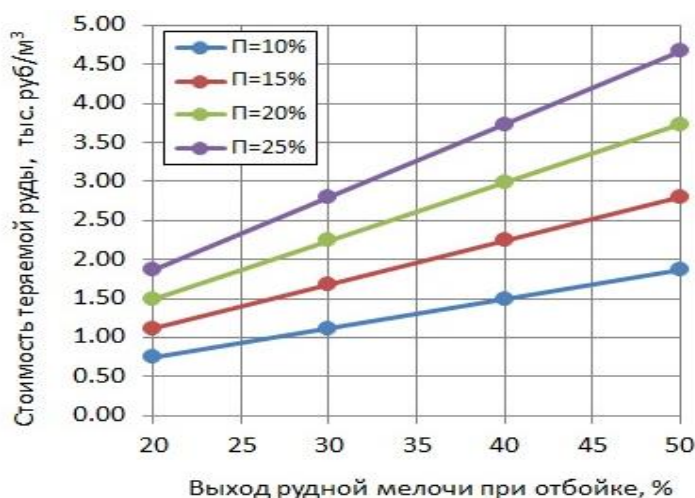


Рис. 2. Стоимость теряемой рудной мелочи в зависимости от уровня общих потерь по системе разработки и выхода мелких фракций при отбойке

Из полученных графиков видно, что прогнозный ущерб от потерь обогащенных мелких фракций руды в зависимости от их выхода при отбойке может составить от 0,75 до 4,7 тыс. руб. на 1 м³ при плотности рудной массы 3,0 т/м³. Следовательно, величина ущерба от потерь рудной мелочи в зависимости от производственной мощности подземного рудника по системе с обрушением (0,5 – 1,2 млн т руды в год) при минимальном выходе рудной мелочи и среднем уровне потерь 15 – 20 % может составить от 180 до 600 млн руб. в год.

Основными факторами, ограничивающими эффективность, временные рамки и возможности технологического воздействия, направленного на снижение ущерба от переизмельчения руды при системах разработки с обрушением, являются [29, 30]:

- заполнение очистного пространства обрушенными породами;
- отбойка и выпуск руды в зажатой среде;
- необходимость обеспечения производственной мощности по добыче руды при высокой концентрации горных работ и ограниченных размерах рудных тел;
- определенный порядок отработки запасов и подработка подготовительных выработок вышележащих горизонтов;
- увеличение относительной величины потерь обогащенной рудной мелочи с уменьшением мощности рудных тел.

С учетом данных факторов, на основе обобщения опыта разработки и осуществления технологических решений для различных горно-геологических и горнотехнических условий [31– 43], применительно к системам с обрушением руды и вмещающих пород становится возможным выделить следующие основные направления преобразования элементов ГТС для снижения ущерба от переизмельчения руд:

- в технологической подсистеме ГТС – оптимизация параметров или совершенствование технологических процессов очистной выемки;
- в горной конструкции ГТС – изменение ее параметров или преобразование горнотехнических свойств ее отдельных элементов;
- в технической подсистеме ГТС – совершенствование применяемых или включение в цикл очистной выемки новых оборудования или инженерных средств.

В соответствии с выделенными направлениями и типами способов определены перспективные технические решения для снижения ущерба от переизмельчения руды при системах с обрушением (рис. 3).

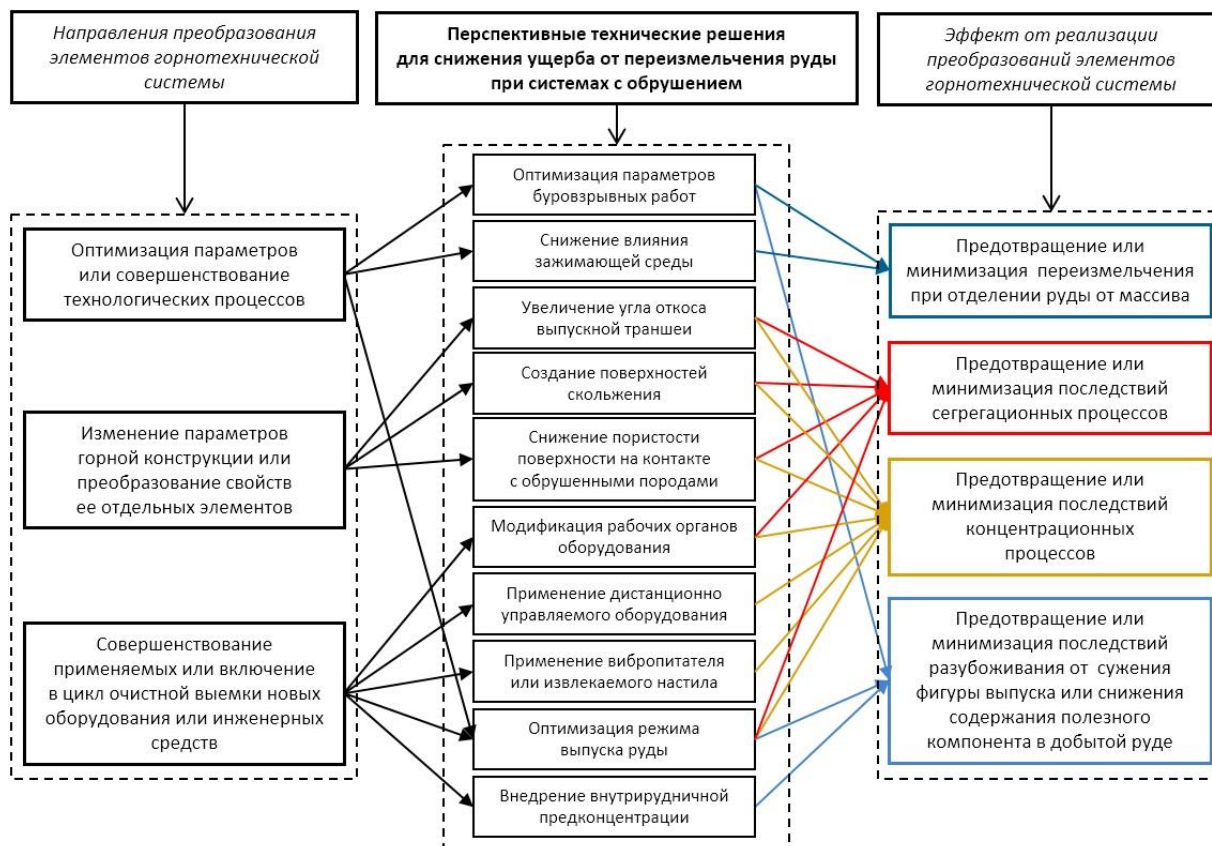


Рис. 3. Перспективные технические решения для снижения ущерба от переизмельчения руды при системах с обрушением

Представленные решения могут быть использованы самостоятельно или в комплексе. Вместе с тем в зависимости от складывающихся при отработке конкретного месторождения условий сочетания способов снижения ущерба могут составлять разнообразные комбинации. Количество используемых технических решений так или иначе будет ограничено экономическими соображениями и оценкой их эффективности.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что при системах разработки с обрушением руды и вмещающих пород переизмельчение при отбойке рудного массива и последующие сегрегационно-концентрационные процессы при выпуске наносят значительный ущерб эффективности функционирования ГТС. Оценка экономического ущерба от потерь обогащенных металлом мелких фракций позволяет говорить о целесообразности разработки и реализации технических решений, которые позволили бы повысить полноту извлечения запасов недр. Определенные в настоящей работе направления и типы способов снижения ущерба от переизмельчения руды являются основой для разработки и совершенствования конструкции системы разработки и геотехнологических процессов очистной выемки. Технические решения по снижению отрицательных последствий переизмельчения должны осуществляться на принципах синергии с технологией извлечения основной части запасов. Изменения в структуре ГТС не должны приводить к значительному увеличению объемов проведения подготовительно-нарезных выработок, продолжительности отработки выемочной единицы и усложнению

технологических процессов очистной выемки, тем самым обеспечивая необходимую эффективность, интенсивность и безопасность подземной геотехнологии.

Список литературы

1. Агошков М.И., Никаноров В.И., Панфилов Е.И., 1974. *Технико-экономическая оценка извлечения полезных ископаемых из недр*. Москва: Недра, 312 с.
2. Яковлев В.Л., Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., 2024. Изыскание новых приемов к учету свойств и строения массива при дезинтеграции его буровзрывным способом в динамике разработки сложноструктурных месторождений. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 4 (164), С. 86-96. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-86-96
3. Смирнов А.А., Рожков А.А., 2018. Исследования действия взрыва веера скважинных зарядов. *Взрывное дело*, № 119-76, С. 118-128. EDN LUJFQD.
4. Dominy S.C., Glass H.J., Minnitt R.C.A., 2022. Sampling Broken Ore Residues in Underground Gold Workings: Implications for Reconciliation and Lost Revenue. *Minerals*, Vol. 12, 667. DOI: 10.3390/min12060667
5. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 360 с., ISBN 978-5-7691-2514-0.
6. Волков Ю.В., Соколов И.В., Камаев В.Д., 2002. *Выбор систем подземной разработки рудных месторождений*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН. 124 с., ISBN 5-7691-1226-X.
7. Iravani A., Åström J.A., Ouchterlony F., 2018. Physical Origin of the Fine-Particle Problem in Blasting Fragmentation. *Physical Review Applied*, Vol. 10(3), 034001. DOI:10.1103/physrevapplied.10.034001
8. Савич И.Н., 2004. *Научное обоснование технологических решений при подземной разработке кимберлитовых месторождений*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.22. Москва, 44 с.
9. Ломоносов Г.Г., Шангин С.С., Юсимов Б.В., 2013. Повышение извлечения мелких фракций золотосодержащих руд при подземной разработке маломощных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S27, С. 12-18.
10. Казаков Н.Н., Шляпин А.В., 2018. Распределение энергии скважинного заряда по фазам, зонам и видам затрат к концу развития камуфлетной фазы. *Взрывное дело*, № 119-76, С. 20-35.
11. Савич И.Н., Барнов Н.Г., Мустафин В.И., 2024. Параметры буровзрывных работ и гранулометрический состав рудной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S15, С. 3-9. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_15_3.
12. Попов Н.И., Иванов А.А., 1979. *Снижение потерь отбитой руды при разработке наклонных залежей*. Магадан: Книжное изд-во, 62 с.
13. Хайрутдинов М.М., 1990. *Повышение эффективности системы этажного принудительного обрушения за счет создания экранирующей поверхности на границах вторичных блоков*: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. Москва, 21 с.
14. Лаптев Ю.В., Титов Р.С., 2016. Оптимизация высоты слоя техногенного образования для его эффективной отработки. *Известия вузов. Горный журнал*, № 1, С. 4-10.
15. Дронов Н.В., 1970. Исследование самосортировки руды по крупности при выпуске. *Совершенствование технологии подземной разработки рудных месторождений*. Фрунзе: Илим, С. 129-137.
16. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А., 2015. Влияние класса крупности медно-никелевого рудного сырья и его изменчивости на показатели обогащения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3, С. 104-107.

17. Савич И.Н., 2021. Обоснование параметров систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений. *Горный журнал*, № 9, С. 18-21. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.03.
18. Мажитов А.М., Волков П.В., 2019. *Обрушение руды и вмещающих пород при разработке пологих месторождений*. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 124 с.
19. Панфилов Е.И., 2008. Оценка воздействий на недра и возможных последствий при разработке месторождений полезных ископаемых. *Горная промышленность*, № (78), С. 26-32.
20. Захаров В.Н., Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н., 2023. Гипотезы оптимизации параметров функционирования горнотехнических систем с применением методов прогнозной аналитики. *Горная промышленность*, № 5, С. 38-42. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.
21. Чмыхалова С.В., 2020. Системный подход к оценке риска, способствующий предотвращению потерь и повышению безопасности горного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6-1, С. 146-153. DOI 10.25018/0236-1493-2020-61-0-146-153.
22. Рыльникова М.В., Митишова Н.А., 2019. Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 9, С. 41-51. DOI 10.25018/0236-1493-2019-09-0-41-51.
23. Рыльникова М.В., Айнбиндер Г.И., Есина Е.Н., 2020. Требования и факторы безопасной отработки месторождений колчеданных руд. *Горная промышленность*, № 2, С. 82-87. DOI 10.30686/1609-9192-2020-2-82-87.
24. Соколов И.В., Рожков А.А., Антипин Ю.Г., 2023. Методический подход к обоснованию технологий снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 352-367. EDN NFGXWZ.
25. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В., 2023. Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений. *Горная промышленность*, № 5, С. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82. EDN UYCLRI.
26. Туртыгина Н.А., Елизарьева А.П., Шаров С.А., 2022. Исследования взрывоселекции рудо-породного массива с позиции стабилизации качества руд при добыче. *Научный вестник Арктики*, № 13, С. 94-100. DOI: 10.52978/25421220_2022_13_94-100.
27. Смирнов А.А., Барановский К.В., Рожков А.А., 2020. Применение принципов ресурсосбережения при отбойке крепких трещиноватых руд веерами скважинных зарядов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3-1, С. 300-312. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-300-312.
28. Белин В.А., Крюков Г.М., 2011. Итоги развития теории разрушения горных пород взрывом. *Взрывное дело*, № 105-62, С. 3-17.
29. Каплунов Д.Р., Юков В.А., 2013. К оценке интенсивности эксплуатации рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 1, С. 48-52.
30. Лизункин М.В., Лизункин В.М., Ситников Р.В., 2021. Опыт гидромеханической зачистки обогащенной рудной мелочи. *Рациональное освоение недр*, № 5(61), С. 34-38. DOI: 10.26121/RON.2021.76.11.003.
31. Рожков А.А., 2021. Систематизация способов снижения потерь рудной мелочи при подземной разработке месторождений. *Проблемы недропользования*, №3 (30), С. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016. EDN LPADUR.
32. Xingwana L., 2016. 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*. № 116, P. 149-160. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6

33. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Рожков А.А., 2020. Модернизация системы разработки маломощного месторождения богатых медноколчеданных руд. *Устойчивое развитие горных территорий*, Т. 12, № 3(45), С. 444-453. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453.
34. Глотов В.В., Пахалуев Б.Г., 2016. Оптимизация расстояния между стенками желобов при гидрозачистке выемочных блоков. *Вестник Забайкальского государственного университета*, Т. 22, № 4, С. 4-9.
35. Biegaj K., 2012. Why do shareholders and mining executives allow mine managers to leave behind high-grade broken ore underground? In *Proceedings «Narrow Vein Mining 2012», The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne*, pp. 197-206.
36. Tuck M., 2010. Stope Cleaning – Historical Methods and Future Developments. *Proceedings: Gravity Gold 2010 Conference*, pp. 25-26.
37. Rupprecht S., 2013. Loading and hauling of broken rock in a narrow tabular orebody utilizing scraper winches. *Conference: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Underground Load and Haul. Conference Paper*, pp. 1-12.
38. Pickering R. G. B. 2006. Long hole drilling applied to narrow reef mining. *International Platinum Conference «Platinum Surges Ahead»: proceedings. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, P. 199-207.
39. Grave M., 2009. Controlling stoping costs in a gold mining environment. *World Gold Conference: proceedings. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. P. 99-106.
40. O'Beime D., 1979. The hydraulic cleaning of stopes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 207-209.
41. Du Plessis A.G, Wymer D.G., Joughin N.C., 1989. Equipment alternatives for stoping in gold mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 387-394.
42. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинова Н.М., Конарева Т.Г., Андрющенко А.С., 2023. Совершенствование схем добычи и переработки руд при освоении сложно-структурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 2, С. 57-67. DOI 10.15372/FTPRPI20230206.
43. Версилов С.О., Максимов А.А., 2017. О формировании оптимальных рудопотоков при отработке рудных запасов с применением адаптивных питателей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 1, С. 238-242.

References

1. Agoshkov M.I., Nikanorov V.I., Panfilov E.I., 1974. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka izvlecheniya poleznykh iskopayemykh iz neдр* [Technical and economic assessment of extraction of minerals from the subsurface]. Moscow: Nedra, 312 p.
2. Yakovlev V.L., Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A., 2024. Izyskanie novykh priemov k uchetu svoistv i stroeniya massiva pri dezintegratsii ego burovzryv-nym sposobom v dinamike razrabotki slozhnostrukturnykh mestorozhdenii [Searching for new techniques to account for the properties and structure of the massif during its disintegration by the drilling and blasting method in the dynamics of the development of complex deposits]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 4 (164), P. 86-96. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-86-96
3. Smirnov A.A., Rozhkov A.A., 2018. Issledovaniya deistviya vzryva veera skvazhinnykh zaryadov [Investigation of the effect of the explosion of a fan of borehole charges]. *Vzryvnoe delo*, № 119-76, P. 118-128. EDN LUJFQD.
4. Dominy S.C., Glass H.J., Minnitt R.C.A., 2022. Sampling Broken Ore Residues in Underground Gold Workings: Implications for Reconciliation and Lost Revenue. *Minerals*, Vol. 12, 667. DOI: 10.3390/min12060667

5. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [The innovation basis of the integrated strategy of raw materials development]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN, 360 p., ISBN 978-5-7691-2514-0.
6. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Kamaev V.D., 2002. Vybór sistem podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [Selection of underground mining systems for ore deposits]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN. 124 p., ISBN 5-7691-1226-X.
7. Iravani A., Åström J.A., Ouchterlony F., 2018. Physical Origin of the Fine-Particle Problem in Blasting Fragmentation. *Physical Review Applied*, Vol. 10(3), 034001. DOI:10.1103/physrevapplied.10.034001
8. Savich I.N., 2004. Nauchnoe obosnovanie tekhnologicheskikh reshenii pri podzemnoi razrabotke kimberlitovykh mestorozhdenii [Scientific substantiation of technological solutions in the underground mining of kimberlite deposits]: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 25.00.22. Moscow, 44 p.
9. Lomonosov G.G., Shangin S.S., Yusimov B.V., 2013. Povyshenie izvlecheniya melkikh fraktsii zolotosoderzhashchikh rud pri podzemnoi razrabotke malomoshchnykh mestorozhdenii [Increased extraction of small fractions of gold-bearing ores during underground mining of lowyield deposits]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S27, P. 12-18.
10. Kazakov N.N., Shlyapin A.V., 2018. Raspredelenie energii skvazhinного zaryada po fazam, zonam i vidam zatrat k kontsu razvitiya kamufletnoi fazy [Distribution of well charge energy by phases, zones, and types of costs by the end of the camouflage phase development]. Vzryvnoe de-lo, № 119-76, P. 20-35.
11. Savich I.N., Barnov N.G., Mustafin V.I., 2024. Parametry burovzryvnykh работ i granulometricheskii sostav rudnoi massy [Parameters of drilling and blasting operations and the granulometric composition of the ore mass]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S15, P. 3-9. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_15_3.
12. Popov N.I., Ivanov A.A., 1979. Snizhenie poter' otbitoi rudy pri razrabotke naklonnykh zalezhei [Reduction of losses of beaten ore during the development of inclined deposits]. Magadan: Knizhnoe izd-vo, 62 p.
13. Khairutdinov M.M., 1990. Povyshenie effektivnosti sistemy etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya za schet sozdaniya ekraniruyushchei poverkhnosti na granitsakh vtorichnykh blokov [Improving the efficiency of the floor forced collapse system by creating a shielding surface at the boundaries of secondary blocks]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.15.02. Moscow, 21 p.
14. Laptev Yu.V., Titov R.S., 2016. Optimizatsiya vysoty sloya tekhnogenного obrazovaniya dlya ego effektivnoi otrabotki [Optimization of the height of the technological education layer for its effective development]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 1, P. 4-10.
15. Dronov N.V., 1970. Issledovanie samosortirovki rudy po krupnosti pri vypuske [Investigation of ore self-sorting by size during production]. Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii. Frunze: Ilim, P. 129-137.
16. Lomonosov G.G., Turtygina N.A., 2015. Vliyanie klassa krupnosti medno-nikelevogo rudного syr'ya i ego izmenchivosti na pokazateli obogashcheniya [The influence of the fineness class of copper-nickel ore raw materials and its variability on the enrichment indicators]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 3, P. 104-107.
17. Savich I.N., 2021. Obosnovanie parametrov sistem s prinuditel'nym obrusheniem pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Substantiation of the parameters of systems with forced collapse during underground mining of ore deposits]. Gornyi zhurnal, № 9, P. 18-21. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.03.
18. Mazhitov A.M., Volkov P.V., 2019. Obrushenie rudy i vmeshchayushchikh porod pri razrabotke pologikh mestorozhdenii [Collapse of ore and host rocks during the development of shallow deposits]. Magnitogorsk: Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova, 124 p.

19. Panfilov E.I., 2008. Otsenka vozdeistvii na nedra i vozmozhnykh posledstviy pri razrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Assessment of impacts on the subsurface and possible consequences during the development of mineral deposits]. Gornaya promyshlennost', № 2(78), P. 26-32.

20. Zakharov V.N., Ryl'nikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N., 2023. Gipotezy optimizatsii parametrov funktsionirovaniya gornotekhnicheskikh sistem s primeneniem metodov prognoznnoi analitiki [Hypotheses of optimization of parameters of functioning of mining engineering systems using methods of predictive analytics]. Gornaya promyshlennost', № 5, P. 38-42. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-38-42.

21. Chmykhalova S.V., 2020. Sistemnyi podkhod k otsenke riska, sposobstvuyushchii predotvrashcheniyu poter' i povysheniyu bezopasnosti gornogo proizvodstva [Systematic approach to risk assessment that helps to prevent losses and improve the safety of mining operations]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6-1, S. 146-153. DOI 10.25018/0236-1493-2020-61-0-146-153.

22. Ryl'nikova M.V., Mitishova N.A., 2019. Metodika issledovaniy vzryvo-opasnosti ubogosul'fidnykh rud pri podzemnoi otrabotke kolchedannykh mestorozhdenii [Methodology for investigating the explosivity of low-grade sulfide ores during underground mining of pyrite deposits]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 9, P. 41-51. DOI 10.25018/0236-1493-2019-09-0-41-51.

23. Ryl'nikova M.V., Ainbinder G.I., Esina E.N., 2020. Trebovaniya i faktory bezopasnoi otrabotki mestorozhdenii kolchedannykh rud [Requirements and factors of safe mining of pyrite ore deposits]. Gornaya promyshlennost', № 2, P. 82-87. DOI 10.30686/1609-9192-2020-2-82-87.

24. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Antipin Yu.G., 2023. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke [Methodological approach to substantiating technologies for reducing damage from ore over-grinding during underground mining]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, № 3, P. 352-367. EDN NFGXWZ.

25. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2023. Parametrizatsiya tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii [Parameterization of the technology for reducing damage from over-grinding of ore during underground mining]. Gornaya promyshlennost', № 5, P. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82. EDN UYCLRI.

26. Turtygina N.A., Elizar'eva A.P., Sharov S.A., 2022. Issledovaniya vzryvoselekttsii rudo-porodnogo massiva s pozitsii stabilizatsii kachestva rud pri dobyche [Investigations of explosive extraction of ore-rock mass from the perspective of ore quality stabilization during mining]. Nauchnyi vestnik Arktiki, № 13, P. 94-100. DOI: 10.52978/25421220_2022_13_94-100.

27. Smirnov A.A., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., 2020. Primenenie printsipov resursosberezheniya pri otkoike krepkikh treshchinovatykh rud veerami skvazhinnykh zaryadov [Application of the principles of resource saving in the extraction of strong fractured ores using borehole charges]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 3-1, P. 300-312. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-300-312.

28. Belin V.A., Kryukov G.M., 2011. Itogi razvitiya teorii razrusheniya gornykh porod vzryvom [Results of the development of the theory of rock destruction by explosion]. Vzryvnoe delo, № 105-62, P. 3-17.

29. Kaplunov D.R., Yukov V.A., 2013. K otsenke intensivnosti ekspluatatsii rudnykh mestorozhdenii [On assessment of the intensity of exploitation of ore deposits]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 1, P. 48-52.

30. Lizunkin M.V., Lizunkin V.M., Sitnikov R.V., 2021. Opyt gidromekhanicheskoi zachistki obogashchennoi rudnoi melochi [Experience of hydro-mechanical stripping of enriched ore fines]. Ratsional'noe osvoenie neдр, № 5(61), P. 34-38. DOI: 10.26121/ROD.2021.76.11.003.

31. Rozhkov A.A., 2021. Sistematizatsiya sposobov snizheniya poter' rudnoi melochi pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii [Systematization of ways to reduce the loss of ore fines during underground mining]. *Problemy nedropol'zovaniya*, №3 (30), P. 16-28. DOI 10.25635/2313-1586.2021.03.016. EDN LPADUR.
32. Xingwana L., 2016. 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*. № 116, P. 149-160. DOI: 10.17159/2411-9717/2016/v116n2a6
33. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., 2020. Modernizatsiya sistemy razrabotki malomoshchnogo mestorozhdeniya bogatyykh mednokolchedannykh rud [Modernization of the system for the development of a low-potential deposit of rich copper ores]. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii*, Vol. 12, № 3(45), P. 444-453. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453.
34. Glotov V.V., Pakhaluev B.G., 2016. Optimizatsiya rasstoyaniya mezhdu stenkami zhelobov pri gidrozachistke vyemochnykh blokov [Optimization of the distance between the gutter walls during hydraulic cleaning of excavation blocks]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, T. 22, № 4, S. 4-9.
35. Biegaj K., 2012. Why do shareholders and mining executives allow mine managers to leave behind high-grade broken ore underground? In *Proceedings «Narrow Vein Mining 2012», The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne*, pp. 197-206.
36. Tuck M., 2010. Stope Cleaning – Historical Methods and Future Developments. *Proceedings: Gravity Gold 2010 Conference*, pp. 25-26.
37. Rupprecht S., 2013. Loading and hauling of broken rock in a narrow tabular orebody utilizing scraper winches. *Conference: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Underground Load and Haul. Conference Paper*, pp. 1-12.
38. Pickering R. G. B. 2006. Long hole drilling applied to narrow reef mining. *International Platinum Conference «Platinum Surges Ahead»: proceedings. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, P. 199-207.
39. Grave M., 2009. Controlling stoping costs in a gold mining environment. *World Gold Conference: proceedings. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. P. 99-106.
40. O'Beime D., 1979. The hydraulic cleaning of stopes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 207-209.
41. Du Plessis A.G., Wymer D.G., Joughin N.C., 1989. Equipment alternatives for stoping in gold mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 387-394.
42. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvinova N.M., Konareva T.G., Andryushchenko A.S., 2023. Sovershenstvovanie skhem dobychi i pererabotki rud pri osvoenii slozhno-strukturnykh mestorozhdenii [Improvement of ore extraction and processing schemes in the development of complex-structured deposits]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 2, P. 57-67. DOI 10.15372/FTPRPI20230206.
43. Versilov S.O., Maksimov A.A., 2017. O formirovanii optimal'nykh rudopotokov pri otrabotke rudnykh zasposov s primeneniem adaptivnykh pitatelei [On the formation of optimal ore flows during the development of ore reserves using adaptive feeders]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 1, P. 238-242.