

Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений

И.В. Соколов✉, А.А. Рожков, К.В. Барановский

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ geotech@igduran.ru

Резюме: При подземной разработке месторождений во многих случаях происходит снижение полноты извлечения запасов недр и эффективности геотехнологии, связанное с переизмельчением руды в процессе очистной выемки. Следовательно, обоснование технологий снижения ущерба от переизмельчения руды – является актуальной научно-технической задачей. На основе использования системного подхода и модульного принципа проектирования горнотехнических систем предложено выделение таких технологий в отдельный геотехнологический модуль в рамках подсистемы очистной выемки. Для повышения объективности принятия эффективных решений на стадии проектирования горнотехнической системы определены системные признаки основного источника ущерба, места его формирования и технологических способов воздействия на него. Выполнена параметризация геотехнологического модуля, позволившая структурировать взаимосвязи технологии снижения ущерба от переизмельчения руды со смежными модулями подсистемы очистной выемки, горно-геологическими, горнотехническими, экономическими, природно-климатическими и другими условиями осваиваемого участка недр.

Ключевые слова: горнотехническая система, переизмельчение руды, ущерб, геотехнологический модуль, технология снижения ущерба

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 1 (FUWE-2022-0005)

Для цитирования: 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>

Parameterization of mining technology to reduce losses from undue pulverization of ores in underground mining

I.V. Sokolov✉, A.A. Rozhkov, K.V. Baranovsky

Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ geotech@igduran.ru

Abstract: In numerous cases, underground mining is characterized with decreasing reserve recovery rates and falling efficiency of the mining technology due to undue pulverization of ores during their extraction. Consequently, justification of technologies to reduce losses from undue pulverization of ores is a topical scientific and engineering task. Based on the use of a systematic approach and the modular principle of designing mining systems, it is proposed to separate such technologies into a geotechnological module within the framework of the ore stoping subsystem. Systemic characteristics of the main source of losses, the place of its formation and the technological methods to counteract it are determined to increase the objectivity in justification of such technologies at the stage of designing the mining technical system. Parameterization of the geotechnological module was carried out, which made it possible to structure the relationship of the technology for reducing losses from undue pulverization of ores with adjacent modules of the ore stoping subsystem, mining-geological, mining-technical, economic, natural-climatic and other conditions of the developed subsurface site.

Keywords: mining system, undue pulverization of ores, losses, geotechnological module, loss reduction measures

Acknowledgements: The research was performed within the framework of the State Contract No.075-00412-22 PR, Topic 1 (FUWE-2022-0005)

For citation: 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>

Введение

В При подземной разработке месторождений во многих случаях происходит снижение полноты и эффективности освоения запасов недр, связанное с переизмельчением руды при очистной выемке [1–4]. При добыче металлических руд следствием переизмельчения является ущерб, выражающийся в потерях обогащенной рудной мелочи или дополнительных затратах, снижении производительности и безопасности горных работ при последующем извлечении мелких фракций из очистного пространства. При добыче неметаллических руд ущерб от переизмельчения обуславливается строгими требованиями к минимальной кондиционной крупности кусков или сохранности кристаллов. Несмотря на значительное количество существующих способов снижения потерь рудной мелочи, помимо критерия оценки их экономической эффективности, универсальная методика по обоснованию рациональных технологий снижения ущерба от переизмельчения руды на стадии проектирования горнотехнической системы (ГТС) фактически отсутствует. Таким образом, развитие методов обоснования данных технологий представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Методология исследования

Путем решения указанной задачи является применение концепции системного подхода и модульного принципа проектирования ГТС, предложенных чл.-корр. РАН Д.Р. Каплуновым, проф. В.Н. Калмыковым и проф. М.В. Рыльниковой [5]. Учет технологий снижения ущерба от переизмельчения руды в структуре ГТС предлагается выделением их в отдельный геотехнологический модуль в рамках подсистемы очистной выемки.

Признаком возможности выделения в отдельный модуль является самостоятельность и цикличность мероприятий, поскольку для их реализации требуется выполнение специальных технологических или организационных действий, которые также возможно полностью исключить из цикла очистной выемки, что оказывает непосредственное влияние на эффективность и безопасность функционирования ГТС в целом [6–9]. Установлено, что ущерб, к которому напрямую или косвенно приводит переизмельчение руды, можно разделить на четыре основные группы: I – снижение полноты извлечения запасов недр; II – снижение интенсивности освоения участка недр; III – снижение экономической эффективности ГТС; IV – снижение безопасности. Основные виды ущерба при подземном способе добычи зависят от типа добываемых руд (металлические,

неметаллические) и применения или неприменения технологических мероприятий.

Для эффективной реализации системного подхода и модульного принципа проектирования ГТС необходима объективная параметризация геотехнологического модуля. Под параметризацией нами понимается процесс выбора и структуризации условий и параметров, необходимых для учета тесной взаимосвязи рассматриваемых мероприятий со смежными модулями подсистемы очистной выемки, горно-геологическими, горнотехническими, экономическими, природно-климатическими и другими условиями осваиваемого участка недр [10]. Следовательно, требуется определить системные признаки основного источника ущерба (потери рудной мелочи), места его формирования (очистное пространство) и технологических способов воздействия на него.

Результаты исследований и их обсуждение

С точки зрения эффективности функционирования ГТС главное значение имеют показатели отработки основной части запасов выемочных единиц. Применяемая при этом система разработки в достаточной мере учитывает основные горно-геологические факторы – глубину залегания, размеры, мощность и угол падения рудных тел, крепость и устойчивость руд и вмещающих пород. Применительно к технологическому воздействию на основной источник ущерба (потери обогащенной или некондиционной рудной мелочи) более значимы складывающиеся горнотехнические и специфические условия освоения участка недр [11]. Для их учета предложена классификация потерь рудной мелочи по категориям (обогащенная, рядовая, некондиционная), состоянию (свободное или стесненное) и условиям нахождения в очистном пространстве (горнотехническая характеристика очистного пространства) (табл. 1).

Данная классификация позволяет дать исчерпывающую горнотехническую характеристику очистного пространства для целей изыскания и обоснования способа и параметров технологического воздействия на образующуюся в процессе добычи рудную мелочь в зависимости от класса применяемой системы разработки. Необходимо отметить, что помимо условий при трех основных классах (с естественным поддержанием очистного пространства, с обрушением руды и вмещающих пород, с искусственным поддержанием очистного пространства), также следует учитывать специфику сочетаний технологий разных классов в пределах одной выемочной единицы (комбинированные системы разработки).

Таблица 1
Горнотехническая классификация потерь рудной мелочи в очистном пространстве

Table 1
Mining technical classification of the ore fines lost in the stopping area

Классификационные признаки		Горнотехническая характеристика очистного пространства			
Категория теряемой рудной мелочи	Состояние в очистном пространстве	Подстилающая поверхность			Кровля
		Тип	Вид	Угол наклона	Состояние кровли
I. Обогащенная II. Рядовая III. Некондиционная а) по качеству б) по содержанию	1. Свободное а) связанное (уплотнение, слеживание, смерзание) б) несвязное 2. Стесненное а) под обрушенными породами б) в закладочном материале	Монолитная	Рудный массив	1. Пологий (0–20°)	1. Устойчивое а) контролируемое б) Неконтролируемое 2. Обрушенное
			Породный массив		
			Твердеющая закладка		
		Разрыхленная	Рудная масса	2. Наклонный (20–60°)	
			Породная масса		
			Сухая закладка		

Категория теряемой мелочи характеризует тип руд и влияние на их извлекаемую ценность, позволяя определить этап очистной выемки, на котором возможно предотвратить или минимизировать виды ущерба I группы. Состояние нахождения рудной мелочи в очистном пространстве характеризует способ выпуска руды, отражает специфику свойств рудной массы и температурного режима в горных выработках. Характеристики подстилающей поверхности очистного пространства определяют рациональные способы преобразования горнотехнических условий или воздействия на рудную мелочь. Состояние кровли характеризует очистное пространство с точки зрения возмож-

ности нахождения в нем людей, оборудования и техники.

До настоящего времени основным признаком технологии снижения ущерба от переизмельчения руды являлись применяемые силы и инструменты воздействия (ручной, гидравлический, механический и др.) [12]. Для применения системного подхода данный признак недостаточен, поскольку не обладает пространственно-временными свойствами. Для устранения этого недостатка предложена соответствующая систематизация (табл. 2).

Пространственные условия (горнотехническая характеристика очистного пространства) определяются применяемой системой разработки. В таком случае временной

Таблица 2
Систематизация технологий снижения ущерба от переизмельчения руды

Table 2
Systematization of mining technologies to reduce losses from undue pulverization of ores

Группа	Вид	Вариант		
Последовательность осуществления относительно цикла очистной выемки	Силы и инструменты воздействия	Способ технологического воздействия		
		Безвзрывной	Самообрушение руды Невзрывные расширяющиеся смеси Отбойка гидромолотом Комбайновая выемка Выбуривание керна или выпиливание блоков	
		Экранирующий	Отбойка руды на неразборные настилы Отбойка руды на разборные настилы Формирование экрана тампонированием Формирование экранирующей щели	
		Буровзрывной	Сетка скважин или шпуров Конструкция зарядов и тип ВВ Порядок инициирования Комбинированный	
		Конструктивный	Увеличение угла поверхностей выпуска Уменьшение площади поверхностей выпуска	
	Превентивные	Селективный	Крупное дробление руды и переизмельчение породы для последующего разделения	
		Конструктивно-буровзрывной	Щадящая отбойка с созданием условий самотечного выпуска мелочи	
		Реактивные	Ручной	Ручные немеханизированные инструменты
			Гидравлический	Напорный водный поток
				Слабонапорный водный поток
				Безнапорный водный поток
			Вакуумный	Сбор вакуумной установкой
			Пневматический	Энергия сжатого воздуха
Механический	Самоходное оборудование			
	Переносное оборудование			
Кинетический	Сброс крупнофракционного материала			
Взрывокинетический	Сотрясательное взрывание			
	Накладной заряд Фугасный заряд			
Гидромеханический	Водный поток с последующим перемещением смывой мелочи механическими средствами			
	Механические средства с водонапорным оборудованием			
Вакуумно-механический	Вакуумная установка, оборудованная механическими средствами для разупрочнения			
Пневмомеханический	Разупрочнение механическими средствами, перемещение энергией сжатого воздуха			
Комбинированные	Буровзрыво-гидравлический	Формирование грансостава, позволяющего повысить эффективность использования энергии водного потока		
	Конструктивно-гидравлический	Создание «гладких» поверхностей, повышающих эффективность гидрозащитки		
	Конструктивно-механический	Создание «гладких» поверхностей, повышающих эффективность работы механических средств		
	Прочие	Прочие сочетания превентивных и реактивных способов		



Рис. 1
Структура условий и параметров геотехнологического модуля «Снижение ущерба от переизмельчения руды»

Fig. 1
The structure of the conditions and parameters of the geotechnological module “Reducing losses from undue pulverization of ores”

характеристикой будет порядок осуществления технологических мероприятий по снижению ущерба от переизмельчения относительно цикла по извлечению запасов полезного ископаемого.

По последовательности осуществления технологии разделены на следующие группы:

- превентивные – осуществляемые до начала цикла по извлечению запасов полезного ископаемого в блоке или непосредственно во время отделения руды от массива;
- реактивные – осуществляемые после отделения руды от массива или по завершении цикла;
- комбинированные – сочетание превентивных и реактивных способов, обеспечивающее достижение синергетического эффекта.

Признаком разделения на виды служит известный принцип основных применяемых сил и инструментов воздействия, на варианты – способ технологического воздействия.

С учетом классификации потерь рудной мелочи и систематизации технологий снижения ущерба от переизмельчения руды параметризована структура условий и параметров геотехнологического модуля в рамках ГТС (рис. 1).

Внешние условия геотехнологического модуля, а именно горно-геологические, экономические, инфраструктурные и природно-климатические, оказывают значительное влияние на выбор конкретной технологии снижения ущерба от переизмельчения руды через внутренние условия. В частности, определяют технологию отработки основных запасов выемочной единицы. Каждому классу систем разработки соответствуют определенные группы технологий по последовательности их осуществления. В зависимости от горно-геологических, экономических и инфраструктурных условий, технологии характерны определенные уровни интенсивности и концентрации горных работ. В системе внутренних условий эти факторы становятся ограничительными и определяют временные и про-

странственные рамки. Специфическим внутренним условием становится категория теряемой рудной мелочи, зависящая от экономических условий и определяющая целесообразность внедрения рассматриваемого модуля и необходимую последовательность осуществления технологических мероприятий относительно цикла по извлечению запасов полезного ископаемого в блоке. Локальные внутренние условия определяют рациональные виды способов и параметры вариантов технологического воздействия. Состояние нахождения рудной мелочи в очистном пространстве зависит от класса системы разработки, применяемых на очистной выемке технических средств и природно-климатических условий.

В зависимости от совокупности внешних и внутренних условий формируются основные входные данные геотехнологического модуля – последовательность осуществления, способ технологического воздействия и необходимые для этого ресурсы. Основным выходным параметром модуля, характеризующим условия его реализации, является степень технологической интегрированности. Интегрированность выражается обособлением или совмещением технологических процессов рассматриваемого модуля с процессами других модулей подсистемы очистной выемки в пространстве, времени, используемых технических средствах и других ресурсах.

Качество учета совокупности внешних и внутренних условий на стадии проектирования ГТС, выбор рациональных входных и выходных параметров модуля с учетом имеющихся ограничений и других факторов – определяют уровень показателей эффективности и безопасности технологии снижения ущерба от переизмельчения руды.

Заключение

На основе модульного принципа проектирования ГТС предложено выделение технологий снижения ущерба от переизмельчения руды в отдельный геотехнологический модуль подсистемы очистной выемки. Показано, что данные технологии отвечают критерию самостоятельности, а их наличие или отсутствие в значительной мере влияет на показатели эффективности и безопасности функционирования ГТС. Для повышения объективности обоснования таких технологий на стадии проектирования ГТС определены системные признаки основного источника ущерба, места его формирования и технологических способов воздействия на него. Выполнена параметризация геотехнологического модуля, позволившая структурировать взаимосвязи технологии снижения ущерба от переизмельчения руды со смежными модулями подсистемы очистной выемки, горно-геологическими, горнотехническими, природно-климатическими и другими условиями осваиваемого участка недр.

Список литературы

1. Ломоносов Г.Г., Шангин С.С., Юсимов Б.В. Повышение извлечения мелких фракций золотосодержащих руд при подземной разработке малощных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(S27):12–18.
2. Wang L., Jing H., Yu J., Liu X. Impact of particle shape, size, and size distribution on gravity flow behavior of broken ore in sublevel caving. *Minerals*. 2022;12(10):1183. <https://doi.org/10.3390/min12101183>
3. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Рожков А.А. Физическое моделирование взрывной отбойки высокоценного кварца. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2017;15(1):4–9. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9>

4. Лизункин М.В., Лизункин В.М., Ситников Р.В. Исследование гидромеханического способа зачистки обогащенной рудной мелочи с почвы выработанного пространства. *Инженерная физика*. 2020;(11):54–60. <https://doi.org/10.25791/infizik.11.2020.1177>
5. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Калмыков В.Н. Научно-методическое обоснование модульного принципа проектирования горнотехнических систем. *Недропользование XXI век*. 2009;(5):74–78. Режим доступа: <https://nedra21.ru/archive/132/2247/>
6. 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
7. Li X., Liu K., Qiu T., Sha Y., Yang J., Song R. Numerical study on fracture control blasting using air-water coupling. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2023;9:29. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00546-y>
8. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*. 2020;15(5):e0232640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232640>
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. Калмыков В.Н., Мещеряков Э.Ю., Волков П.В. Обоснование параметров геотехнологического модуля «Очистные работы» при освоении запасов в приконтурных зонах карьеров. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011;(4):5–8.
11. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Технология взрывной отбойки крепких ценных руд при веерном расположении скважин. *Записки горного института*. 2019;237:285–291. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.291>
12. Рожков А.А. Систематизация способов снижения потерь рудной мелочи при подземной разработке месторождений. *Проблемы недропользования*. 2021;(3):16–28. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.03.016>

References

1. 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.)
2. Wang L., Jing H., Yu J., Liu X. Impact of particle shape, size, and size distribution on gravity flow behavior of broken ore in sublevel caving. *Minerals*. 2022;12(10):1183. <https://doi.org/10.3390/min12101183>
3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A. Physical modelling of blasting in high-grade quartz mining. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017;15(1):4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-1-4-9>
4. Lizunkin M.V., Lizunkin V.M., Sitnikov R.V. Investigation of a hydromechanical method for cleaning enriched ore fines from the soil of the developed space. *Engineering Physics*. 2020;(11):54–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/infizik.11.2020.1177>
5. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V., Kalmykov V.N. Rationale of the modular principle of mining engineering system design. *Nedropolzovanie XXI vek = 21 Century Subsoil Use*. 2009;(5):74–78. (In Russ.) Available at: <https://nedra21.ru/archive/132/2247/>
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
7. Li X., Liu K., Qiu T., Sha Y., Yang J., Song R. Numerical study on fracture control blasting using air-water coupling. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2023;9:29. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00546-y>
8. Wu J. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*. 2020;15(5):e0232640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232640>
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. Kalmykov V.N., Mecserykov E.Y., Volkov P.V. Substantiation parameter the geotechnological module “Clearing works” at development of stocks in border zones of open-cast mines. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2011;(4):5–8. (In Russ.)
11. 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. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.291>
12. Rozhkov A.A. Systematization of methods to reduce losses of fine ore during underground mining. *Problems of Subsoil Use*. 2021;(3):16–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.03.016>

Информация об авторах

Соколов Игорь Владимирович – доктор технических наук, действительный член Академии Горных наук, директор, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: geotech@igduran.ru

Рожков Артём Андреевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.09.2023

Поступила после рецензирования: 04.10.2023

Принята к публикации: 05.10.2023

Information about the authors

Igor V. Sokolov – Dr. Sc. (Eng.), Full Member of the Academy of Mining Sciences, Director, Institute of Mining Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: geotech@igduran.ru

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

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

Article info

Received: 17.09.2023

Revised: 04.10.2023

Accepted: 05.10.2023