

УДК 622.272.06

**Соколов Игорь Владимирович**

доктор технических наук,  
директор Института горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [direct@igduran.ru](mailto:direct@igduran.ru)

**Антипин Юрий Георгиевич**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией  
подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Барановский Кирилл Васильевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория подземной геотехнологии  
Институт горного дела УрО РАН

**Рожков Артем Андреевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН

**Никитин Игорь Владимирович**

научный сотрудник,  
лаборатория подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ ПОЛОГИХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЕДНЫХ  
КОМПЛЕКСНЫХ РУД\****Аннотация:*

Традиционные системы разработки пологих месторождений бедных комплексных руд характеризуются весьма низкими показателями извлечения запасов, а также повышенными затратами на подготовку и очистную выемку. Применение в данных условиях комбинированной системы разработки, основанной на сочетании этажно-камерной системы с сухой закладкой (или заполнением очистного пространства принудительно обрушенными налегающими породами), и системы этажного обрушения с торцевым выпуском руды позволяет достичь совокупного эффекта от комплексного снижения потерь и разубоживания руды, уменьшения эксплуатационных затрат на добычу руды, увеличения производственной мощности рудника, повышения безопасности ведения горных работ.

*Ключевые слова:* пологие месторождения, вкрапленные руды, подземная разработка, комбинированная система разработки, показатели извлечения, эффективность горных работ.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033

**Sokolov Igor V.**

Doctor of Engineering Sciences, Director,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.,  
e-mail: [direct@igduran.ru](mailto:direct@igduran.ru)

**Antipin Yuriy G.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Laboratory of underground  
geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Baranovsky Kirill V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**Rozkov Artem A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**Nikitin Igor V.**

Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY  
OF UNDERGROUND MINING OF GENTLY  
SLOPING DEPOSITS OF LOW-GRADE  
COMPLEX ORES***Abstract:*

Traditional systems for the development of flat deposits of low-grade complex ores are characterized by very low rates of recovery of reserves, as well as by increased costs for preparation and stoping excavation. In this conditions, the use of a combined development system of the storey-chamber system with dry backfilling (or filling of worked out space through collapsing of overlying rocks) and the level caving system with buttend ore drawing allows to simultaneously achieve the results of a complex reduction of losses and of ore dilution, reduction of operating costs of ore extraction, increase of production capacity of the mine, and ensuring the safety of mining operations.

*Key words:* gently sloping deposits, interspersed ores, underground mining, combined mining system, extraction indicators, mining efficiency.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки №075-00412-22 ПП, тема 1. FUWE-2022-0005.

### *Введение*

В условиях неуклонного снижения объема добычи богатых медно-никелевых руд возникает острая необходимость в расширении минерально-сырьевой базы для поддержания мощностей действующего обогатительного и металлургического производства за счет вовлечения в эксплуатацию бедных вкрапленных руд и значительного увеличения объема их добычи [1, 2]. Другим фактором, способствующим освоению запасов бедных медно-никелевых руд, является их комплексный состав, обеспечивающий существенное увеличение извлекаемой ценности добытой и обогащенной многокомпонентной руды [3].

Наиболее крупными месторождениями вкрапленных медно-никелевых руд являются следующие: эксплуатируемое «Норильск-1»; перспективные для освоения «Масловское» и «Черногорское» [4]. Специфические условия отработки этих месторождений: пологое падение (до 15°) и переменная средняя мощность (от 2 до 25 м) рудных тел, наличие трещиноватых и слабоустойчивых подстилающих пород, крепких и устойчивых налегающих пород, обуславливающих необходимость принудительной посадки кровли, низкое содержание полезных компонентов (менее 0,5 – 1 %) в комплексных рудах – требуют пересмотра известных технологических решений и изыскания более прогрессивных технологий добычи.

Традиционные технологии, применяемые для отработки пологих залежей в зависимости от их мощности, – камерно-столбовая система разработки, система этажного (подэтажного) обрушения с торцевым выпуском руды – характеризуются весьма низкими показателями извлечения запасов (потери руды достигают 20 – 50 %, разубоживание – 25 – 30 %), а также значительными затратами на подготовительно-нарезные работы и очистную выемку [5 – 7].

Таким образом, изыскание основных направлений и перспективных способов повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд является актуальной научно-технической задачей.

#### *Анализ и обобщение опыта подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд*

В результате анализа установлено, что для отработки пологих рудных залежей средней мощности применяются все основные классы систем разработки и их комбинации.

Камерно-столбовые системы разработки характеризуются высокими потерями руды в неизвлекаемых целиках (до 50 %), что не соответствует принципам полноты и комплексности извлечения запасов недр. Необходимость закрепления кровли камер, частое разрушение столбчатых целиков и постоянное нахождение людей в очистном пространстве отрицательно влияют на безопасность технологии. Применение данного класса систем перспективно лишь при наличии неравномерного распределения полезных компонентов в рудном теле за счет обеспечения возможности селективной выемки [8 – 12].

Системы с обрушением руды и вмещающих пород характеризуются высокой производительностью и самым низким качеством добытой руды. Сложность организации проходческих и очистных работ, сильная изрезанность днища блоков и необходимость принудительного проветривания забоев отрицательно влияют на безопасность технологии. Потери и разубоживание руды, составляющие до 25 – 30 % и более, большой удельный объем ПНР и дополнительные затраты на полное принудительное погашение выработанного пространства в условиях крепких и устойчивых пород кровли не позволяют эффективно использовать данный класс систем разработки и соответствовать принципу полноты и комплексности извлечения запасов недр [13 – 15].

Лучшими показателями полноты и качества извлечения руды обладают системы с твердеющей закладкой выработанного пространства. Однако высокая себестоимость

технологического процесса закладки выработанного пространства твердеющими смесями и низкая производительность очистной выемки не позволяют эффективно использовать их при отработке бедных руд и обеспечить значительное повышение производительной мощности в сложившихся горно-геологических и горнотехнических условиях. Применение данного класса систем перспективно при наличии слоя богатых руд [16 - 21].

Сущность комбинированных систем разработки (КСР) позволяет использовать преимущества технологий каждого класса при их сочетании в одной выемочной единице путем наилучшей адаптации к изменчивости условий конкретного месторождения или его участка. Варианты КСР обладают широкими возможностями управления горным давлением, при этом не предусматривая оставление неизвлекаемых целиков. КСР позволяют достичь показателей извлечения, значительно превосходящих варианты камерно-столбовых систем и технологий с обрушением руды и вмещающих пород, характеризуются более высоким уровнем интенсивности отработки запасов, чем при технологиях с искусственным поддержанием очистного пространства. Рассмотренные варианты КСР обеспечивают технико-экономические показатели (ТЭП), недостижимые в данных условиях для каждой из сочетаемых систем в отдельности, однако они предназначены для выемки богатых руд при мощности рудных тел, близкой или превышающей предельную рассматриваемую – 25 м и более [22 – 27].

Относительно отработки бедных комплексных руд наиболее перспективным решением представляется изыскание КСР, отвечающей критерию оптимума себестоимости, полноты, комплексности и интенсивности извлечения запасов.

#### *Изыскание эффективной технологии и направлений ее совершенствования*

В результате выполненных исследований, включающих изыскание, конструирование и технико-экономическое сравнение рациональных вариантов систем разработки, установлено, что в условиях пологих месторождений вкрапленных медно-никелевых руд достижение более высоких ТЭП (табл. 1) возможно путем применения КСР, основанной на сочетании этажно-камерной системы с сухой закладкой (или заполнением принудительно обрушенными налегающими породами) при выемке основных запасов блока и системы этажного обрушения с торцевым выпуском руды при выемке целиков [28].

Таблица 1

#### **Основные показатели по вариантам систем разработки**

Показатель	Единицы измерения	Система разработки				
		этажного обрушения		камерно-столбовая	комбинированная	
Мощность залежи	м	10	20	10	10	20
Потери	%	25,0	20,0	50,0	12,8	13,6
Разубоживание	%	30,0	25,0	8,0	17,5	20,7
Удельный объем ПНР	м <sup>3</sup> /1000т	80,0	35,0	102,0	90,3	45,1
Удельные затраты на добычу руды	руб/т	3900	3000	4870	3560	2730

Для отработки залежи средней мощностью 10 м предложен вариант КСР, предусматривающий отработку камер с последующей их закладкой пустой породой и дальнейшую выемку междукамерных целиков (МКЦ) совместно с обрушением налегающих пород (рис. 1а). Параметры блока: длина – 100 м, ширина – 24 м, высота – 10 м. Выемка камерных запасов осуществляется путем секционной (3 – 4 слоя) отбойки нисходящих веерообразных скважин, разбуренных из буро-вентиляционного орта, располагаемого в кровле

камеры, и последующего выпуска и доставки отбитой руды из очистного пространства камеры до рудоспуска с помощью погрузо-доставочной машины (ПДМ) с дистанционным управлением (ДУ). Отсыпка пустой породы в отработанной камере ведется из буровентиляционного орта в кровле камеры. Для повышения устойчивости кровли камеры производится ее анкерное крепление до начала производства буровзрывных работ. Выемка запасов МКЦ ведется путем послышной отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, и послышного торцевого выпуска руды с помощью ПДМ. Одновременно с отбойкой МКЦ производится обрушение налегающих пород на высоту 8 м и формирование выпускной траншеи высотой 9 м.

Для отработки залежи средней мощностью 20 м предложен вариант КСР, предусматривающий отработку камер с последующим их погашением путем принудительного обрушения налегающих пород и дальнейшую выемку МКЦ технологией этажного обрушения (рис. 1б). Параметры блока: длина – 100 м, ширина – 32 м, высота – 20 м. Выемка камерных запасов осуществляется путем секционной отбойки восходящих вееров скважин, разбуренных из буро-доставочного орта, располагаемого на контакте залежи с подстилающими породами, и последующего выпуска и доставки отбитой руды из очистного пространства камеры с помощью ПДМ с ДУ. Принудительное обрушение налегающих пород производится в один прием по всей площади блока на высоту 16 м путем короткозамедленного взрывания встречных вееров скважин, разбуренных из фланговых буровентиляционных штреков, располагаемых в налегающих породах. Выемка запасов МКЦ осуществляется путем послышной отбойки и торцевого выпуска руды под обрушенными породами из породной траншеи высотой 13 м с помощью ПДМ.

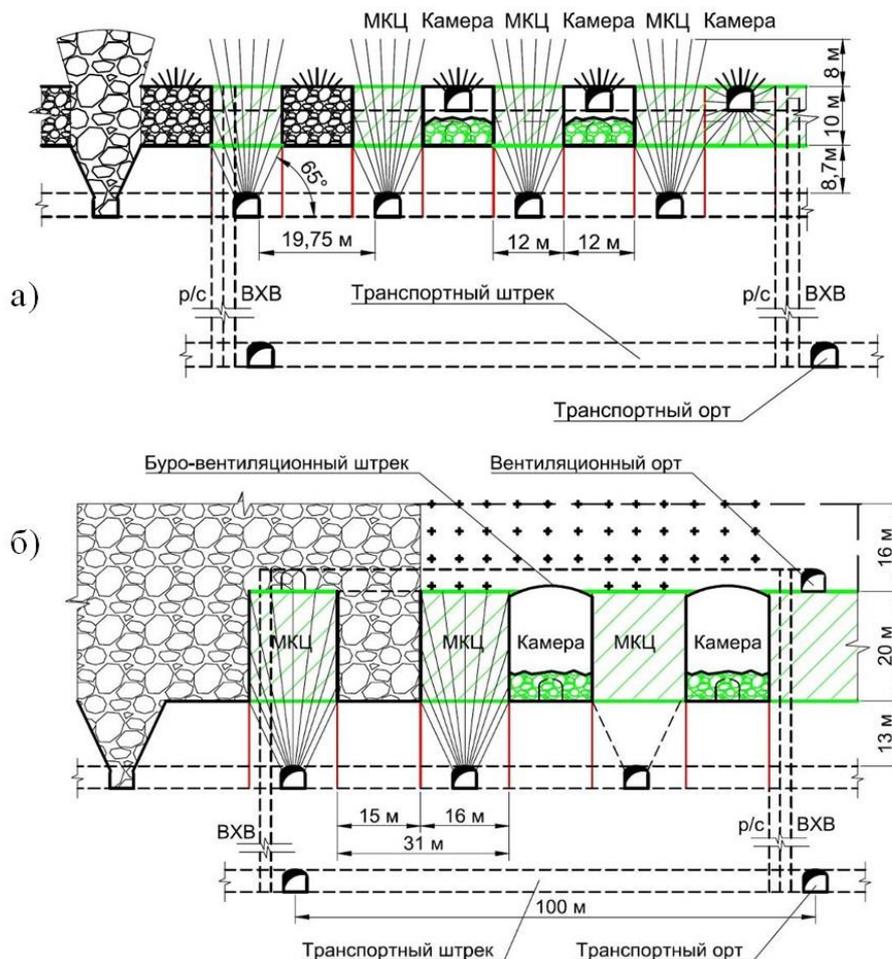


Рис. 1. Комбинированная система разработки для выемки залежи средней мощностью: а – 10 м; б – 20 м

Оба варианта предусматривают камерно-целиковый порядок отработки этажа с расположением камер и МКЦ вкрест простирания залежи. Одновременная работа четырех блоков каждого варианта обеспечивает производственную мощность рудника на уровне 1,2 млн т руды в год.

На основании данных табл. 1 сделан вывод о том, что предложенные варианты КСР по сравнению с традиционной технологией этажного обрушения позволяют одновременно снизить потери руды в 1,5 – 2 раза, разубоживание в 1,2 – 1,7 раза и эксплуатационные затраты на добычу руды – на 10 %.

Очевидно, что имеется большой потенциал для улучшения достаточно высоких полученных ТЭП (см. табл. 1) за счет установления основных направлений по совершенствованию технологии КСР.

Полученные ТЭП следует считать достаточно высокими, при этом очевидно, что имеется большой потенциал для их улучшения. В связи с этим определены основные направления по дальнейшему совершенствованию технологии КСР:

1. Снижение потерь руды (до 2,5 раз) и разубоживания (до 2 раз) путем оптимизации конструкции и параметров конструктивных элементов КСР, схем подготовки блока, отбойки и выпуска руды.

2. Уменьшение эксплуатационных затрат на добычу руды (до 20 %) за счет оптимизации схем подготовки блока и снижения затрат на отбойку, выпуск и доставку руды, погашение выработанного пространства.

3. Увеличение производственной мощности рудника (до 1,5 раз) за счет повышения производительности труда на проходческих и очистных работах и оптимизации состава комплексов самоходного оборудования (СО).

4. Повышение безопасности ведения горных работ на основе обеспечения устойчивости конструктивных элементов КСР на всех стадиях отработки блока.

Для достижения результатов по каждому из направлений предложены пути по совершенствованию КСР, учитывающие накопленный опыт и современные тенденции развития в рассматриваемых направлениях [29 – 30] (табл. 2). Данные пути будут учтены при конструировании оптимальных вариантов КСР.

Таблица 2

**Основные направления и пути совершенствования технологии КСР**

Направления совершенствования	Мероприятия по совершенствованию технологии КСР
1	2
1. Снижение потерь и разубоживания руды	1.1. Увеличение соотношения запасов камеры к запасам целиков за счет увеличения параметров камеры и уменьшения размеров целиков. 1.2. Минимизация запасов в целиках за счет оптимизации их формы (например, треугольная или трапециевидная) и размеров. 1.3. Уменьшение изрезанности основания блока за счет применения комбинированной конструкции днища – сочетание плоского днища камеры с траншейным днищем МКЦ. 1.4. Селективная (раздельная) выемка камерных запасов за счет предварительного оформления породной выпускной траншеи. 1.5. Уменьшение объема мелкой фракции руды на основе оптимизации параметров скважинной отбойки. 1.6. Снижение потерь в днище камеры, в т.ч. рудной мелочи, путем перебура скважин и зачистки почвы ПДМ, бульдозером или формирования «гладких» поверхностей выпускной траншеи. 1.7. Оптимизация параметров камер и целиков и их расположения относительно простирания рудного тела на основе определения эффективного соотношения потерь и разубоживания руды.

## Окончание таблицы 2

1	2
2. Уменьшение эксплуатационных затрат на добычу руды	2.1. Увеличение интенсивности отработки добычных блоков за счет повышения производительности комплексов СО на ПНР и очистной выемке и оптимизации их состава. 2.2. Уменьшение объема ПНР за счет ликвидации горизонта принудительного обрушения путем одновременной отбойки рудного массива и налегающих пород. 2.3. Уменьшение объема проходки полевых выработок на горизонте выпуска и доставке руды из блока за счет применения рудной схемы подготовки камер с плоским днищем. 2.4. Снижение объема бурения скважин путем оптимизации схем и параметров отбойки рудного массива и налегающих пород. 2.5. Снижение затрат на очистную выемку в блоках различной высоты путем применения рациональных способов погашения выработанного пространства. 2.6. Использование пород от проходки выработок и из выпускной траншеи для закладки выработанного пространства.
3. Увеличение производственной мощности рудника	3.1. Эффективное применение высокопроизводительного СО путем одновременного повышения производительности труда на всех процессах очистной выемки и оптимизации состава комплексов. 3.2. Увеличение скорости проходки выработок для обеспечения норматива готовых к выемке запасов при увеличении количества блоков путем оптимизации состава проходческих комплексов СО.
4. Повышение безопасности ведения горных работ	4.1. Обоснование устойчивых параметров камер и целиков КСР на основе геомеханического моделирования. 4.2. Увеличение расстояния между буро-доставочными выработками за счет применения шахматного порядка их расположения. 4.3. Обеспечение минимально возможного нарушения целиков за счет четкого оконтуривания формируемых очистных камер.

### Заключение

Перспективным решением задачи повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд является применение комбинированной системы разработки, предусматривающей комбинацию этажно-камерной системы с сухой закладкой (или заполнением принудительно обрушенными налегающими породами) и системы этажного обрушения с торцевым выпуском руды. Целесообразность ее применения определяется возможностью достижения эффекта одновременно по четырем направлениям: снижение потерь руды (до 2,5 раз) и разубоживания (до 2 раз), уменьшение эксплуатационных затрат на добычу руды (до 20 %), увеличение производственной мощности рудника (до 1,5 раз), повышение безопасности ведения горных работ.

### Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., 2018. Принципы и научно-методические основы формирования нового технологического уклада устойчивого развития горных предприятий России с подземным способом добычи руд. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 5, № 1, С. 127 – 134.
2. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В., 2018. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 360 с.

3. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2022. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд. *Горная промышленность*, № 1S, С. 46 - 52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52.
4. Рябикин В.А., Торгашин А.С., Шклярник Г.К., Осипов Р.А., 2007. Вкрапленные руды норильских медно-никелевых месторождений – перспективный источник платино-металльного сырья. *Цветные металлы*, № 7, С. 16 – 21.
5. Именитов В.Р., 2000. *Системы подземной разработки рудных месторождений*. Москва: МГГУ, 297 с.
6. Савич И.Н., 2014. Проблемы применения систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 366 – 373.
7. Малиновский Е.Г., Ахпашев Б.А., Голованов А.И., Гильдеев А.М., 2019. Сравнение результатов физического моделирования и натурального эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 34 – 44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
8. Аханов Т.М., Прокушев Г.А., 2012. Современное состояние разработки и проблемы развития технологии на этапе доработки Жезказганского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 5 – 12.
9. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., 2014. Совершенствование технологии опытно-промышленной отработки переходной зоны Кыштымского месторождения кварца. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 183 – 189.
10. Сидоров Д.В., 2012. Геомеханическое обоснование конструктивных параметров камерно-столбовой системы разработки для проектирования глубоких горизонтов СУБРа. *Записки Горного института*, Т. 199, С. 134 – 140.
11. Otgieter G.S., Malan D.F., 2010. Preliminary evaluation of the proposed mining method at Eland Platinum Mine. *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust»*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, P. 345 – 352.
12. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L., 2011. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48(1), P. 42 – 50. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.003
13. Пепелев Р.Г., 2011. Оптимизация параметров систем разработок с обрушением руды и вмещающих пород и экономические последствия их изменения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 24 – 28.
14. Малиновский Е.Г., Голованов А.И., Ахпашев Б.А., 2022. Исследования влияния гранулометрического состава отбитой рудной массы на показатели извлечения при системе этажного принудительного обрушения руды физическим моделированием. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 3(151), С. 41 - 53. DOI 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53.
15. Малиновский Е.Г., Ахпашев Б.А., Голованов А.И., Гильдеев А.М., 2019. Сравнение результатов физического моделирования и натурального эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 34 – 44. DOI 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
16. Дарбинян Т.П., Тухватуллин Н.К., Сидоренко Ю.Б., Корецкий А.С., 2016. Опытнo-промышленные испытания камерной системы разработки на залежи «Центральная основная» шахты «Комсомольская». *Горный журнал*, № 7, С. 28 – 31.
17. Алексеев Р.Р., Бритвин Д.С., Волков Е.П., 2019. Конструирование способов отработки наклонных залежей камерной системой разработки с закладкой. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 6 (136), С. 37 – 43. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-37-43.
18. Гузанов П.С., Лытнева А.Э., Анушенков А.Н., Волков Е.П., 2015. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района. *Горный журнал*, № 6, С. 85 – 88. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.17.

19. Курленя М.В., Опарин В.Н., Тапсиев А.П., Аршавский В.В., 1997. *Геомеханические процессы взаимодействия породных и закладочных массивов при отработке пластовых рудных залежей*. Новосибирск: Наука, СО РАН, 245 с.
20. Хайрутдинов М.М., Ковальский А.Б., 2008. Технология и порядок разработки удароопасных участков рудника «Скалистый» с применением системы с закладкой выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 304 – 309.
21. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Овчаренко О.В., 2021. Перспективы развития геотехнологий подземной добычи руд на глубоких рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений. *Горная промышленность*, № 5, С. 70 – 75. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75.
22. Неверов А.А., Неверов С.А., Денисова Е.В., 2011. Геомеханическое обоснование комбинированного способа отработки пологих рудных залежей с закладкой и обрушением под охраняемыми объектами. *Вестник КузГТУ*, № 5, С. 31 – 36.
23. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Ключев М.В., 2020. Обзор комбинированных систем подземной разработки рудных месторождений. *Проблемы недропользования*, № 3 (26), С. 5 – 22. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.005.
24. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А., 2016. Геомеханическая оценка комбинированной системы разработки мощных пологих рудных залежей с закладкой и обрушением. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 114 – 124.
25. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., 2014. Комбинированные геотехнологии и область их применения в условиях гравитационной модели геосреды. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 1, № 1, С. 321 – 327.
26. Неверов А.А., Фрейдин А.М., Неверов С.А., Хмелинин А.П., 2013. Устойчивость поддерживающих целиков и кровли лавных подсечек при комбинированной технологии выемки пологих рудных залежей. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 5 (99), С. 124 – 129.
27. Неверов А.А., 2012. Геомеханическое обоснование нового варианта камерной выемки пологих мощных залежей с выпуском руды из подконсольного пространства. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С. 99 – 109.
28. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В., 2021. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 88 – 104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.
29. Лукичев С.В., Любин А.Н., 2016. Повышение полноты извлечения и качества руд при разработке тонких пологих месторождений. *Проблемы недропользования*, № 4(11), С. 69 – 73. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.069.
30. Тапсиев А.П., Усков В.А., 2012. Повышение показателей извлечения руды при отработке маломощных пологопадающих жил самоходным оборудованием. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 4, С. 125 – 132.

## References

1. Trubetskoi K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., 2018. Printsipy i nauchno-metodicheskie osnovy formirovaniya novogo tekhnologicheskogo uklada ustoichivogo razvitiya gornyx predpriyatii Rossii s podzemnym sposobom dobychi rud [Principles and scientific and methodological foundations for the formation of a new technological way of sustainable development of mining enterprises in Russia with underground method of ore extraction]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyx nauk*, Vol. 5, № 1, P. 127 – 134.
2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [Innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Pod red. chlen-korr. RAN V.L. Yakovleva. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 360 p.

3. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2022. Issledovanie vliyaniya pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' podzemnoi otrabotki mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud [Investigation of the effect of extraction indicators on the efficiency of underground mining of deposits of poor complex ores]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1S, P. 46 – 52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52.
4. Ryabikin V.A., Torgashin A.S., Shklyarik G.K., Osipov R.A., 2007. Vkraplennye rudy noril'skikh medno-nikelevykh mestorozhdenii – perspektivnyi istochnik platinometall'nogo syr'ya [Interspersed ores of the Norilsk copper-nickel deposits as a promising source of platinum-metal raw materials]. *Tsvetnye metally*, № 7, P. 16 – 21.
5. Imenitov V.R., 2000. *Sistemy podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii* [Underground mining systems of ore deposits]. Moscow: MGGU, 297 p.
6. Savich I.N., 2014. Problemy primeneniya sistem s prinuditel'nym obrusheniem pri podzemnoi razrabotke rudnykh mestorozhdenii [Problems of application of systems with induced caving during underground mining of ore deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S1, P. 366 – 373.
7. Malinovskii E.G., Akhpashev B.A., Golovanov A.I., Gil'deev A.M., 2019. Sravnenie rezul'tatov fizicheskogo modelirovaniya i naturnogo eksperimenta po tortsevomu vypusku rudy pri sisteme etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya dlya pologikh zalezhei [Comparison of the results of physical modeling and a full-scale experiment with the buttend drawing of ore with the system of induced level caving for shallow deposits]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 34 – 44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
8. Akhanov T.M., Prokushev G.A., 2012. Sovremennoe sostoyanie razrabotki i problemy razvitiya tekhnologii na etape dorabotki Zhezkazganskogo mestorozhdeniya [Current state of development and problems of technology improvement at the stage of completion of the Zhezkazgan deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 5 – 12.
9. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., 2014. Sovershenstvovanie tekhnologii opytно-promyshlennoi otrabotki perekhodnoi zony Kyshtym'skogo mestorozhdeniya kvartsa [Technology improvement of the opilot-industrial development of the transition zone of the Kyshtym quartz deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 183 – 189.
10. Sidorov D.V., 2012. Geomekhanicheskoe obosnovanie konstruktivnykh parametrov kamerno-stolbovoi sistemy razrabotki dlya proektirovaniya glubokikh gorizontov SUBRa [Geomechanical substantiation of the structural parameters of the room-and-pillar development system for the design of deep horizons of the subsurface]. *Zapiski Gornogo instituta*, Vol. 199, P. 134 – 140.
11. Otgieter G.S., Malan D.F., 2010. Preliminary evaluation of the proposed mining method at Eland Platinum Mine. *The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust», The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, P. 345 - 352.
12. Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L., 2011. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48(1), P. 42 – 50. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2010.06.003
13. Pepelev R.G., 2011. Optimizatsiya parametrov sistem razrabotok s obrusheniem rudy i vmeshchayushchikh porod i ekonomicheskie posledstviya ikh izmeneniya [Optimization of parameters of mining systems with ore and host rocks destruction and economic consequences of their changes]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 10, P. 24 – 28.
14. Malinovskii E.G., Golovanov A.I., Akhpashev B.A., 2022. Issledovaniya vliyaniya granulometricheskogo sostava otbitoi rudnoi massy na pokazateli izvlecheniya pri sisteme etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya rudy fizicheskim modelirovaniem [Studies on the influence of the granulometric composition of the freed ore mass on the indicators of extraction with the system of induced level caving of ore by physical modeling]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 3(151), P. 41-53. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53.

15. Malinovskii E.G., Akhpashev B.A., Golovanov A.I., Gil'deev A.M., 2019. Sravnenie rezul'tatov fizicheskogo modelirovaniya i naturnogo eksperimenta po tortsevomu vypusku rudy pri sisteme etazhnogo prinuditel'nogo obrusheniya dlya pologikh zalezhei [Comparison of the results of physical modeling and a full-scale experiment with the buttend drawing of ore with the system of induced level caving for shallow deposits]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 34 – 44. DOI 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44.
16. Darbinyan T.P., Tukhvatullin N.K., Sidorenko Yu.B., Koretskii A.S., 2016. Opytno-promyshlennyye ispytaniya kamernoi sistemy razrabotki na zalezhi «Tsentral'naya osnovnaya» shakhty «Komsomol'skaya» [Pilot industrial tests of the chamber development system at the Central Main shaft of the Komsomolskaya mine]. *Gornyi zhurnal*, № 7, P. 28 – 31.
17. Alekseev R.R., Britvin D.S., Volkov E.P., 2019. Konstruirovaniye sposobov otrabotki naklonnykh zalezhei kamernoi sistemoi razrabotki s zakladkoi [Construction of ways to mine inclined deposits by a chamber development system with stowing]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 6 (136), P. 37 – 43. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-37-43.
18. Guzanov P.S., Lytneva A.E., Anushenkov A.N., Volkov E.P., 2015. Zakladochnyye smesi na osnove otkhodov obogashcheniya rud v sistemakh podzemnoi razrabotki mestorozhdenii Noril'skogo promyshlennogo raiona [Stowing mixtures based on ore dressing waste in underground mining systems of deposits in Norilsk industrial area]. *Gornyi zhurnal*, № 6, P. 85 – 88. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.17.
19. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Tapsiev A.P., Arshavskii V.V., 1997. Geomekhanicheskie protsessy vzaimodeistviya porodnykh i zakladochnykh massivov pri otrabotke plastovykh rudnykh zalezhei [Geomechanical processes of interaction of rock and stowage mass during the development of stratified ore deposits]. Novosibirsk: Nauka, SO RAN, 245 p.
20. Khairutdinov M.M., Koval'skii A.B., 2008. Tekhnologiya i poryadok razrabotki udaropasnykh uchastkov rudnika «Skalystyi» s primeneniem sistemy s zakladkoi vyrabotannogo prostranstva [Technology and procedure for the development of impact-prone areas of the Skalysty mine using the system with stowing of the developed space]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 7, P. 304 – 309.
21. Ainbinder I.I., Patskevich P.G., Ovcharenko O.V., 2021. Perspektivy razvitiya geotekhnologii podzemnoi dobychi rud na glubokikh rudnikakh Talnakhskogo i Oktyabr'skogo mestorozhdenii [Prospects for the development of geotechnologies for underground ore mining at the deep mines of the Talnakh and Oktyabrsky deposits]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5, P. 70 – 75. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-70-75.
22. Neverov A.A., Neverov S.A., Denisova E.V., 2011. Geomekhanicheskoe obosnovaniye kombinirovannogo sposoba otrabotki pologikh rudnykh zalezhei s zakladkoi i obrusheniem pod okhranyaemymi ob"ektami [Geomechanical substantiation of the combined method of mining ore horizons with laying and collapsing under protected objects]. *Vestnik KuzGTU*, № 5, P. 31 – 36.
23. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Klyuev M.V., 2020. Obzor kombinirovannykh sistem podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [Overview of combined systems of underground mining of ore deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3 (26), P. 5 – 22. DOI :10.25635/2313-1586.2020.03.005.
24. Freidin A.M., Neverov A.A., Neverov S.A., 2016. Geomekhanicheskaya otsenka kombinirovannoi sistemy razrabotki moshchnykh pologikh rudnykh zalezhei s zakladkoi i obrusheniem [Geomechanical evaluation of combined system for development of powerful ore horizons with laying and collapsing]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, P. 114 – 124.
25. Freidin A.M., Neverov S.A., Neverov A.A., 2014. Kombinirovannyye geotekhnologii i oblast' ikh primeneniya v usloviyakh gravitatsionnoi modeli geosredy [Combined geotechnologies and the scope of their application in conditions of the gravity model of the geo-environment]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 1, № 1, P. 321 – 327.

26. Neverov A.A., Freidin A.M., Neverov S.A., Khmelinin A.P., 2013. Ustoichivost' podderzhivayushchikh tselikov i krovli lavnykh podsechek pri kombinirovannoi tekhnologii vyemki pologikh rudnykh zalezhei [Stability of the supporting pillars and the roof of longwall face cuttings with combined technology of excavation of ore horizons]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, № 5 (99), P. 124 – 129.

27. Neverov A.A., 2012. Geomekhanicheskoe obosnovanie novogo varianta kamernoi vyemki pologikh moshchnykh zalezhei s vypuskom rudy iz podkonsol'nogo prostranstva [Geomechanical substantiation of a new variant of the chamber excavation of powerful ore horizons with ore drawing from the underground space]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P. 99 – 109.

28. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V., 2021. Obosnovanie konstruksii i parametrov kombinirovannoi sistemy razrabotki pologo zalezhi bednykh kompleksnykh rud [Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of poor complex ore horizons]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5 – 1, P. 88 – 104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.

29. Lukichev S.V., Lyubin A.N., 2016. Povyshenie polnoty izvlecheniya i kachestva rud pri razrabotke tonkikh pologikh mestorozhdenii [Increasing the completeness of extraction and the quality of ores during the development of thin shallow deposits]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4(11), P. 69 – 73. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.069.

30. Tapsiev A.P., Uskov V.A., 2012. Povyshenie pokazatelei izvlecheniya rudy pri otrabotke malomoshchnykh pologopadayushchikh zhil samokhodnym oborudovaniem [Increase in ore extraction rates during development of narrow flat-dipping veins by self-propelled equipment]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 4, P.125 - 132.