

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

Барановский Кирилл Васильевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: karingist@list.ru

Дьячков Павел Сергеевич

младший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: dyachkov@igduran.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
И ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ
ОБОГАЩЕННОЙ РУДНОЙ МЕЛОЧИ
ПРИ ВЫЕМКЕ ПОЛОГИХ ЗАЛЕЖЕЙ
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ****Аннотация:*

В результате анализа опыта подземной отработки месторождений металлических руд выделены и систематизированы основные группы и виды ущерба, связанного с переизмельчением руды. Одним из главных видов такого ущерба являются потери обогащенной рудной мелочи в очистном пространстве. В настоящей работе для условий подземной разработки пологих залежей вкрапленных руд средней мощности исследовано влияние горно-геологических и горнотехнических факторов на величину данного вида потерь. Предложена методика оценки потерь обогащенной рудной мелочи, отличающаяся учетом влияния неровности почвы очистного пространства и неравномерности толщины слоя теряемой руды по длине и ширине камеры. Рассмотрены такие горно-геологические факторы, как мощность рудного тела и плотность руды в массиве. Из горнотехнических факторов исследованы ширина камеры, высота слоя отбитой руды, параметры неровности почвы очистного пространства и коэффициент обогащенности рудной мелочи. В результате проведенных исследований установлен характер влияния совокупности данных факторов на показатели относительных потерь и абсолютного ущерба. Показано, что

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.016

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

Baranovsky Kirill V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: karingist@list.ru

Dyachkov Pavel S.

Junior Researcher,
Laboratory of Underground Geotechnology,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: dyachkov@igduran.ru

**STUDY OF THE INFLUENCE
OF MINING-GEOLOGICAL
AND MINING-TECHNICAL FACTORS
ON THE AMOUNT OF LOSSES
OF ENRICHED ORE FINES DURING
THE EXTRACTION OF FLAT DEPOSITS
OF MEDIUM THICKNESS***Abstract:*

As a result of the analysis of the experience of underground mining of metal ore deposits, the main groups and types of damage associated with ore overgrinding are identified and systematized. One of the main types of such damage is the loss of enriched ore fines in the stope. In this paper, for the conditions of underground mining of flat deposits of disseminated ores of medium thickness, the influence of mining-geological and mining-technical factors on the value of this type of loss is studied. A technique for estimating the loss of enriched ore fines is proposed, which differs when taking into account the influence of the bottom unevenness of open stope and the unevenness of the lost ore layer along the length and width of the chamber. Such mining-geological factors as the thickness of the ore body and the density of the ore in the massive are considered. The mining-technical factors, the width of the chamber, the height of the broken ore layer, the parameters of the bottom unevenness and the enrichment factor of the ore fines were studied. As a result of the conducted research, the nature of the influence of the set of these factors on the indicators of relative losses and absolute damage was established. It shows that it is advisable to provide for special technological measures to reduce this type of loss. Depending on the enrichment coeffi-

* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки No075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

целесообразно предусматривать специальные технологические мероприятия по снижению данного вида потерь. Установлено, что в зависимости от коэффициента обогащенности рудной мелочи величина ущерба на одну камеру с увеличением ее ширины может составить от 2 – 9 до 9 – 31 млн руб. при минимальной и максимальной высоте теряемого слоя руды, соответственно.

Ключевые слова: пологая залежь, рудная мелочь, переизмельчение руды, камерная выемка, зачистка руды, потери, неровности почвы, ущерб.

cient of ore fines, the amount of damage per chamber can be 2 – 9 million rubles with a minimum height of the lost ore layer and 9 – 31 million rubles with a maximum layer height.

Key words: flat deposit, ore fines, ore overgrinding, open stoping, ore cleaning, losses, bottom unevenness, damage.

Введение

Пологие месторождения бедных вкрапленных руд ограниченной мощности (менее 20 м) Норильской группы, залегающие на значительных глубинах, являются весьма сложными объектами освоения подземным способом [1, 2].

Пологий угол падения рудных тел сводит к минимуму потенциал самотечной доставки руды и способствует повышенному образованию потерь отбитой руды на лезачем боку, а средняя мощность и выемка запасов одним эксплуатационным горизонтом не позволяют доизвлечь теряемую руду при отработке нижележащих выемочных единиц ввиду их отсутствия [3]. В условиях отработки таких месторождений отдельно следует уделить внимание потерям мелких фракций руды (рудной мелочи), обладающих повышенным содержанием полезного компонента [4]. Рудная мелочь образуется в результате переизмельчения в процессе отбойки и выпуска руды. Накопление полезного компонента в мелких фракциях происходит в результате гранулометрической сегрегации за счет большего удельного веса рудных минералов относительно вмещающих пород [5].

Опыт освоения Норильских месторождений вкрапленных руд показывает, что содержание никеля и меди в мелких фракциях руды в 1,5 – 2 и более раз выше, чем в крупных фракциях. Для условий месторождения Норильск-1 установлено, что содержание никеля в кусках отбитой руды с ростом крупности от 5 до 35 см снижается с 0,34 до 0,2 %, меди – с 1,3 до 0,22 % [6]. Применительно к попутно извлекаемым тяжелым металлам, таким как золото и платина, данное соотношение может достигать 2 - 4 и более раз [7].

В условиях отработки пологих и наклонных залежей небольшой мощности объем данного вида потерь достигает 3 – 5 % [8, 9]. Целесообразность минимизации выхода рудной мелочи при отбойке, ее извлечения из очистного пространства или предотвращения осаждения традиционно определяется разностью стоимости теряемой руды и затрат на эти дополнительные мероприятия [10, 11]. С точки зрения оценки экономической эффективности отдельных технологических процессов данный подход логичен и рационален. Вместе с тем сверхнормативные потери металла являются не единственным источником ущерба. В результате проведенного анализа [12] установлено, что основные виды ущерба от переизмельчения металлических руд при подземном способе добычи зависят от применения или неприменения технологических мероприятий (первичный и вторичный ущерб). Подразделяются виды ущерба на четыре основные группы: снижение полноты извлечения запасов недр; снижение экономической эффективности горнотехнической системы; снижение интенсивности освоения участка недр; снижение безопасности освоения участка недр (табл. 1).

Таблица 1

Структура ущерба от переизмельчения металлических руд

Группы ущерба	Условия применения мероприятий по снижению ущерба	
	Без применения (первичный ущерб)	С применением (вторичный ущерб)
	Основные виды ущерба	
<i>Прямой ущерб</i>		
I. Снижение полноты извлечения запасов недр	Значительные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве	Частичные потери обогащенной металлом руды в очистном пространстве
	Повышение потерь полезного компонента в просыпи при погрузке и при транспортировании	
	Потери и разубоживание руды вследствие уменьшения ширины фигуры выпуска	Потери рудной мелочи в результате выноса пульпы из очистного пространства при гидрозачистке блока
II. Снижение экономической эффективности горнотехнической системы	Снижение извлекаемой ценности основных запасов добытой руды	Затраты на поддержание очистного пространства после выемки основных
	Ущерб от потерь обогащенной металлом руды	Затраты на проведение дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи
<i>Косвенный ущерб</i>		
III. Снижение интенсивности освоения участка недр	Повышение степени слеживаемости рудной массы	Необходимость поддержания очистного пространства после выемки основных запасов
	Повышение вероятности и скорости смерзания рудной массы	Затраты времени на осуществление дополнительных мероприятий по извлечению рудной мелочи
		Повышение выхода негабарита
IV. Снижение безопасности освоения участка недр	Повышение риска самовозгорания рудной массы	Низкая технологичность (кустарность) дополнительных мероприятий
	Высокая запыленность рудничной атмосферы	Нахождение людей в очистном пространстве
		Увеличение количества стадий процесса очистной выемки в техногенно-нарушенных условиях
Повышение риска взрывов сульфидной пыли	Снижение устойчивости элементов конструкции при проведении дополнительных взрывных работ	

подавляющее большинство способов снижения потерь обогащенной рудной мелочи предназначено для условий отработки маломощных месторождений. С точки зрения эффективности ГТС известные решения в условиях пологих залежей средней мощности могут быть малоэффективны или вовсе неосуществимы [13–17]. Способствуют этому растущая с мощностью рудных тел интенсивность и объемы очистной выемки

[18], значительный выход негабарита при скважинной отбойке руды [19], отсутствие возможности нахождения в очистном пространстве людей при камерной выемке и технологиях с обрушением руды и вмещающих пород [20].

Недостаточная обоснованность или отсутствие технологических решений на стадии проектирования приводят к невозможности осуществления оптимальных мероприятий, что ведет к снижению эффективности и безопасности функционирования всей ГТС [21].

Поскольку основной целью функционирования ГТС, помимо полноты выемки полезного ископаемого, является экономическая эффективность освоения участка недр [22–24], для обоснования целесообразности применения известных технологических мероприятий по снижению ущерба от переизмельчения руды или разработки новых, актуальной задачей остается оценка влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на величину и ценность потерь обогащенной рудной мелочи.

Теория, материалы и методы исследования

В работе [25] для условий отработки пологих залежей ограниченной мощности было обосновано применение комбинированной системы разработки, при которой 40 – 50 % запасов вынимается камерами с плоским днищем. Невозможность качественной зачистки неровной почвы в совокупности с характером работы погрузо-доставочных машин с дистанционным управлением (ПДМ с ДУ) приводит к тому, что по мере погрузки и доставки руды самоходное оборудование многократно проходит по рудной массе, уплотняя ее [26]. Просыпи руды при погрузке и последующей доставке приводят к увеличению высоты такого уплотненного слоя. Образующиеся при отбойке руды неровности почвы очистного пространства затрудняют зачистку мелких фракций руды.

Схема формирования эксплуатационных потерь при камерной выемке пологих рудных тел представлена на рис. 1.

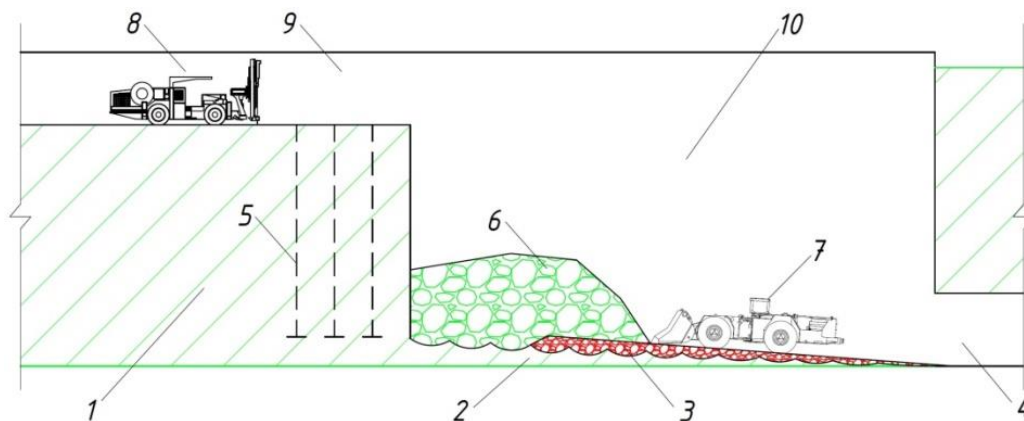


Рис. 1. Схема формирования эксплуатационных потерь при камерной выемке пологих рудных тел:

- 1 – рудный массив; 2 – зона неполной отбойки руды; 3 – слой уплотненной отбитой руды;
- 4 – доставочный штрек; 5 – взрывные скважины; 6 – отбитая руда; 7 – ПДМ с ДУ;
- 8 – буровая установка; 9 – буро-вентиляционный штрек; 10 – очистное пространство

Для объективной оценки величины потерь рудной мелочи и связанного с этим экономического ущерба необходимо рассмотреть основные горно-геологические и горнотехнические факторы. В результате в качестве предмета исследования в настоящей работе приняты такие горно-геологические факторы, как мощность рудного тела и плотность руды в массиве. Из горнотехнических факторов – производственная мощность рудника, ширина камеры, высота слоя отбитой руды, параметры неровности почвы очистного пространства и коэффициент обогащенности рудной мелочи.

При расчете потерь отбитой руды необходимо также учитывать определенное процентное содержание крупных и негабаритных кусков. Абсолютные потери отбитой руды на плоском днище камеры ($\Pi_{отб}$) при некачественной проработке почвы на контакте с подстилающими породами, состоящие из потерь рудной мелочи ($\Pi_{отб}^{рм}$) и крупнокусковой руды ($\Pi_{отб}^{кр}$), могут быть определены следующим образом:

$$\Pi_{отб} = \left(\Pi_{отб}^{рм} + \Pi_{отб}^{кр} \right) k_{нс} k_{нп}, \text{ т}; \quad (1)$$

$$\Pi_{отб}^{рм} = h_{сл} L_k B_k \frac{\gamma_p}{K_p^{рм}} \left[1 - (\eta_{кр} + \eta_{нг}) \right], \text{ т}; \quad (2)$$

$$\Pi_{отб}^{кр} = h_{сл} L_k B_k \frac{\gamma_p}{K_p^{кр}} (\eta_{кр} + \eta_{нг}), \text{ т}, \quad (3)$$

где $k_{нс}$ – коэффициент неравномерности слоя руды, доли ед.; $k_{нп}$ – коэффициент неровности почвы, доли ед.; $h_{сл}$ – высота слоя отбитой руды, м; $K_p^{рм}$ – коэффициент разрыхления рудной мелочи, доли ед.; L_k – длина камеры, м; B_k – ширина камеры, м; γ_p – плотность руды в массиве, т/м³; $\eta_{кр}$ – содержание кусков кондиционной крупности в слое, доли ед.; $\eta_{нг}$ – содержание кусков негабаритной крупности в слое, доли ед.; $K_p^{кр}$ – коэффициент разрыхления крупных фракций руды, доли ед.

Неравномерность слоя теряемой руды определяется его переменной высотой по длине и ширине камеры. При расчетах эта характеристика учитывается соответствующим коэффициентом. В рассматриваемых условиях принимаем $k_{нс} \approx 0,7$, равный отношению средней высоты слоя к его максимальной высоте. Определить исходные параметры слоя возможно путем визуальных или маркшейдерских наблюдений в процессе очистной выемки.

Вместе с тем необходима объективная количественная оценка неровности почвы очистного пространства. Следовательно, при определении значений соответствующего коэффициента необходимо учесть форму и объем неровностей. Известно, что форма неровностей чаще всего представляет собой воронки или борозды, а их глубина может составлять до 0,5 м и более [27]. Поскольку данный коэффициент характеризует некоторое увеличение объема теряемой руды, следовательно, он зависит также и от высоты ее слоя. Для условий камерной выемки с траншейным днищем, при расчете показателей потерь и разубоживания, высоту слоя отбитой руды, теряемой на почве орта, рекомендуется принимать равной 1 м [28]. Учитывая особенности отгрузки руды с почвы плоского днища при помощи ПДМ с ДУ, высоту слоя теряемой руды, представленной преимущественно мелкими фракциями и механически уплотняемой по мере работы самоходного оборудования, с учетом опыта отработки пологих и наклонных рудных тел [27, 29 – 31] можно прогнозировать до 0,5 м.

С учетом вышеизложенных соображений, для углублений воронкообразной формы коэффициент неровности почвы предлагается определять следующим образом:

$$k_{нп} = \frac{h_{сл} + (0,33h_n)}{h_{сл}}, \text{ доли ед.}, \quad (4)$$

где h_n – средняя глубина неровностей почвы, м.

В результате получены искомые значения коэффициента неровности почвы, учитывающего основные параметры теряемого слоя отбитой руды и характеристики подстилающей поверхности очистного пространства (рис. 2).

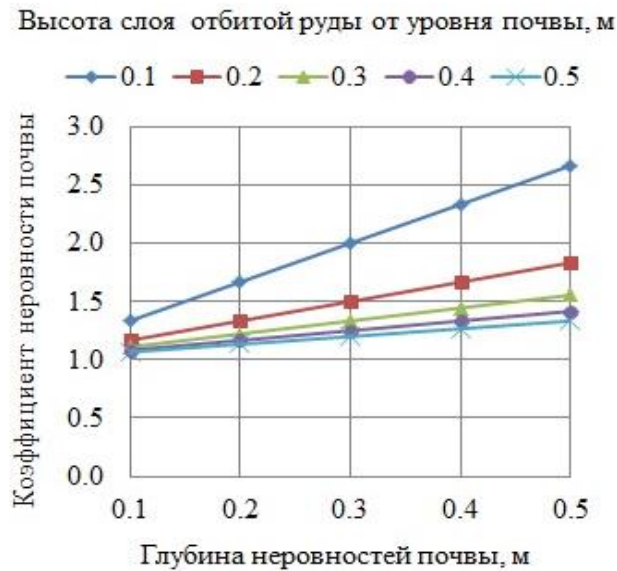


Рис. 2. Изменение коэффициента неровности почвы в зависимости от глубины неровностей при различной высоте слоя отбитой руды

Величина коэффициента закономерно увеличивается с ростом глубины неровностей почвы очистного пространства, причем тем интенсивней, чем меньше высота слоя теряемой руды.

Результаты исследования и их обсуждение

Характер образования рассматриваемого вида потерь отбитой руды при камерной выемке с плоским днищем подсказывает, что его абсолютная величина остается практически неизменной в абсолютных величинах и определяется в первую очередь высотой слоя. Тогда в относительных величинах объем потерь будет зависеть от высоты камеры, равной при отработке пологих залежей мощности рудного тела (рис. 3).

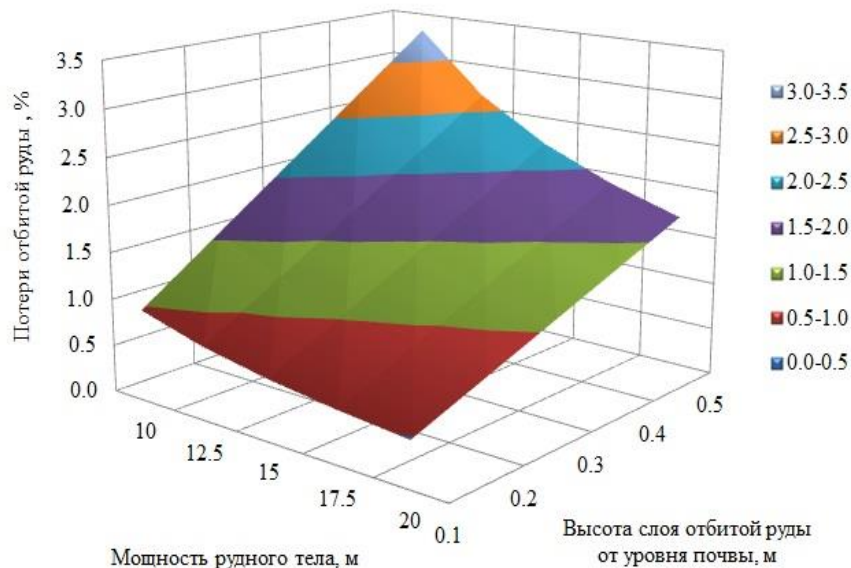


Рис. 3. Зависимость величины потерь от мощности рудного тела и высоты слоя отбитой руды на почве камеры

Из представленного графика видно, что относительная величина потерь растет по мере уменьшения мощности рудного тела и увеличения высоты теряемого слоя руды, составляя от 0,5 до 3,3 %.

Повышенное содержание полезных компонентов в мелких фракциях отбитой руды учитывается коэффициентом обогащенности относительно среднего содержания по блоку. В качестве объективного показателя при оценке ущерба используется также извлекаемая ценность руды, учитывающая рыночную цену, количество и содержание полезных компонентов, показатели извлечения при добыче и обогащении, с которыми потерянная руда могла бы быть добыта при качественном оформлении днища камеры [32].

Тогда ущерб от потерь отбитой руды на почве плоского днища ($Y_{отб}$) можно определить следующим образом:

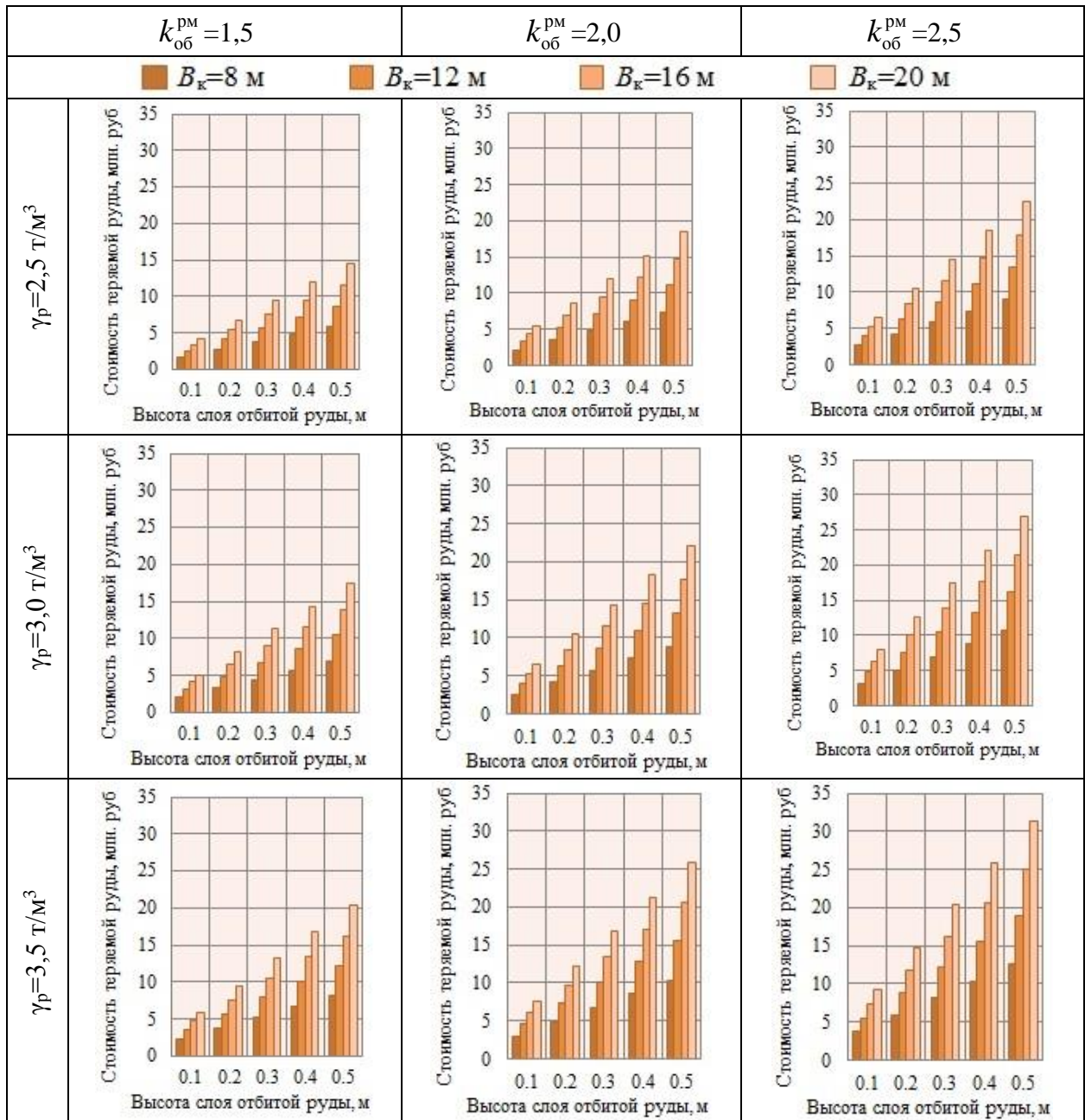
$$Y_{отб} = \left(\Pi_{отб}^{PM} \Pi_{изв} k_{об}^{PM} \right) + \left(\Pi_{отб}^{KP} \Pi_{изв} \right), \text{ руб.}, \quad (5)$$

где $k_{об}^{PM}$ – коэффициент обогащенности рудной мелочи, доли ед.; $\Pi_{изв}$ – извлекаемая ценность руды, руб./т.

Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние коэффициента обогащенности рудной мелочи и плотности руды в массиве на стоимость теряемой руды в зависимости от ширины камеры



Экономический ущерб, отнесенный на одну камеру при ее постоянной длине 76 м, представлен в виде зависимостей от высоты слоя отбитой руды на плоском днище (от 0,1 до 0,5 м) и ширины камеры (от 8 до 20 м). Также исследовано влияние обогащенности рудной мелочи (с учетом опыта отработки месторождения Норильск-1 и других месторождений металлических руд коэффициент обогащенности принят в диапазоне 1,5 – 2,5) и плотности руды в массиве (2,5 – 3,5 т/м³). При исследовании было принято, что средняя глубина неровностей почвы составляет 0,2 м, а коэффициент разрыхления с учетом механического уплотнения составляет 1,2.

Установлено, что в зависимости от коэффициента обогащенности рудной мелочи величина ущерба на одну камеру с увеличением ее ширины может составить от 2 - 9 до 9 – 31 млн руб. при минимальной и максимальной высоте теряемого слоя руды, соответственно.

Количество камер, обрабатываемых ежегодно, зависит от их ширины, производственной мощности рудника и мощности рудного тела. Исходя из горнотехнических особенностей комбинированной системы разработки [25] приняты следующие параметры ширины камер в зависимости от мощности рудного тела:

- при мощности рудного тела 10 м – ширина камер 8 м;
- при мощности рудного тела 15 м – ширина камер 12 м;
- при мощности рудного тела 20 м – ширина камер 16 м;
- при мощности рудного тела 25 м – ширина камер 20 м.

В зависимости от данных параметров определено количество обрабатываемых в год камер, необходимое для обеспечения годовой производственной мощности рудника в диапазоне от 0,8 до 1,6 млн т в год (рис. 4).

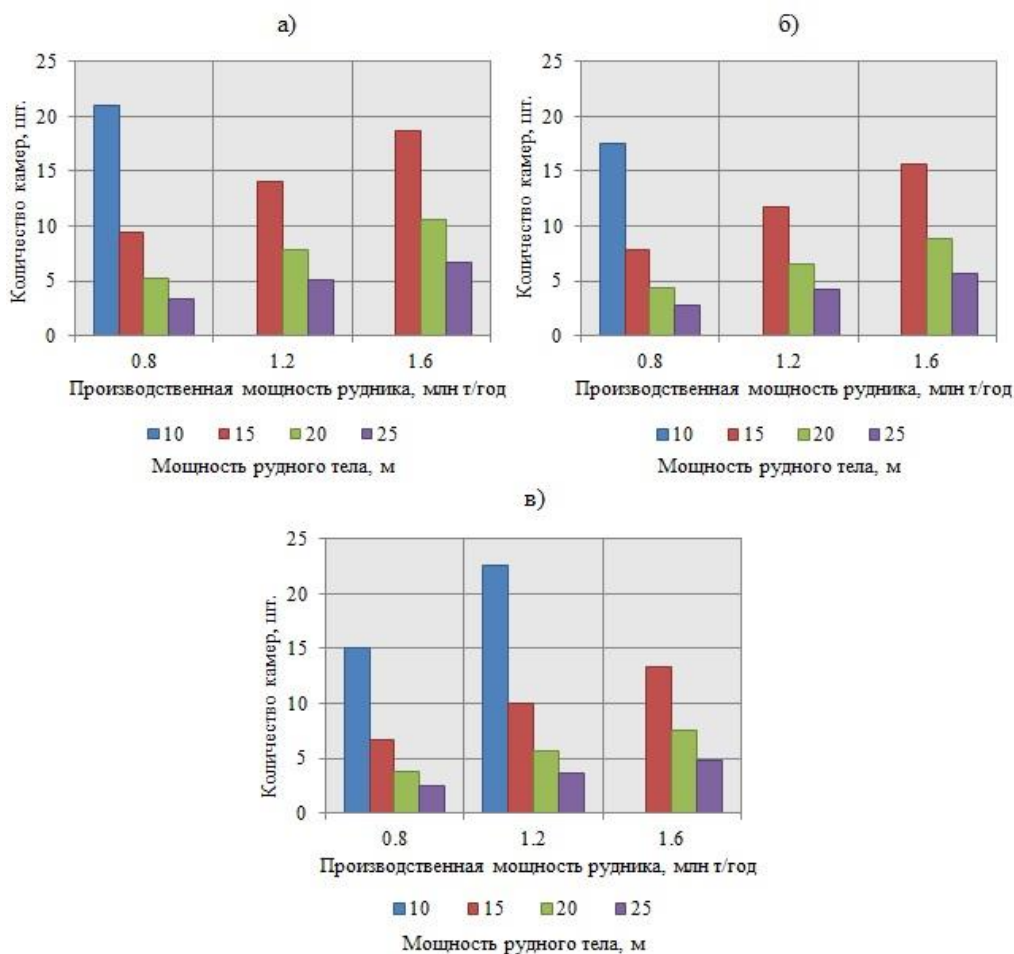


Рис. 4. Необходимое количество камер для обеспечения производственной мощности рудника в зависимости от мощности рудного тела и плотности руды:
а) при плотности руды в массиве 2,5 т/м³; б) при плотности руды в массиве 3,0 т/м³;
в) при плотности руды в массиве 3,5 т/м³

С учетом полученных данных становится возможным определение годового экономического ущерба от потерь обогащенной рудной мелочи. В качестве примера рассмотрен случай с минимальными значениями высоты теряемого слоя (0,1 м), плотности руды ($2,5 \text{ т/м}^3$) и коэффициента обогащенности (1,5). Установлено, что величина ущерба растет с уменьшением мощности рудного тела и увеличением производственной мощности рудника (рис. 5).

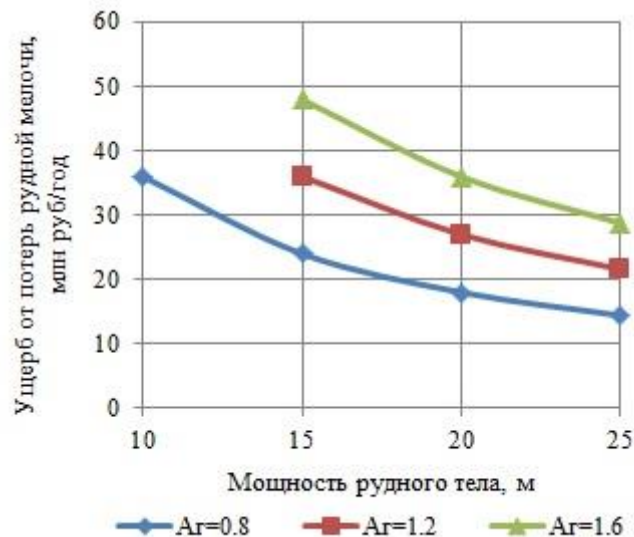


Рис. 5. Ущерб от потерь рудной мелочи в зависимости от мощности рудного тела при различной производственной мощности рудника

Таким образом, даже минимальный ущерб от потерь обогащенной рудной мелочи позволяет говорить о целесообразности разработки и применения специальных технологических мероприятий по его снижению.

Заключение

В результате проведенных исследований установлен характер влияния совокупности горно-геологических и горнотехнических факторов на показатели потерь обогащенной рудной мелочи и обусловленного ими экономического ущерба. Учитывая величину годового ущерба при выемке камер в зависимости от годовой производственной мощности рудника, ширины выемочных единиц, плотности руды в массиве, степени обогащенности рудной мелочи, характеристик слоя теряемой руды и поверхности почвы очистного пространства, можно сделать вывод о целесообразности применения специальных технологических мероприятий по снижению данного вида потерь. При обосновании таких технологических решений необходимо учитывать и другие виды ущерба от переизмельчения руды, оказывающие влияние на показатели эффективности и безопасности функционирования ГТС в целом.

Список литературы

1. Яковлев В.Л., 2022. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*, № S1, С. 34-45. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.
2. 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.
3. Волков Ю.В., Соколов И.В, Камаев В.Д., 2002. *Выбор систем подземной разработки рудных месторождений*. Ответственный редактор проф., д.т.н. Боликов В.Е.

Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 124 с., ISBN 5-7691-1226-X.

4. 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.

5. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А., 2014. Явление сегрегации рудной массы и его влияние на формирование качества продукции горнорудного производства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 37-40.

6. 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.

7. Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2020. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, Т. 18, № 1, С. 16-22. DOI 10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22.

8. Павлов А.М., Семенов Ю.М., 2007. Применение вакуумной технологии при зачистке руды в условиях криолитозоны рудника «Ирокинда». *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 24 - 29.

9. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

10. Агошков М.И., 1972. *Научные основы оценки экономических последствий потерь полезных ископаемых при разработке месторождений*. Москва: АН СССР, 149 с.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Ситников Р.В., 2010. Гидромеханическая зачистка рудной мелочи - эффективный путь снижения потерь руды. *Вестник Читинского государственного университета*, № 2 (59), С. 18-22.

15. Рогизный В.Ф., Хромов В.М., Карпухина М.В., 2020. Технологии селективной выемки маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования. *Горная промышленность*, № 1, С. 34-41.

16. 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.

17. 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.

18. Каплунов Д.Р., Юков В.А., 2013. К оценке интенсивности эксплуатации рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 1, С. 48-52.

19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., 2019. Technology of Blasting of Strong Valuable Ores with Ring Borehole Pattern. *Journal of Mining Institute*, Vol. 237, P. 285-291. DOI 10.31897/PMI.2019.3.285.

20. Барановский К.В., Рожков А.А., 2019. Исследование параметров технологии подземной добычи гранулированного кварца. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 123-135. DOI 10.25635/IM.2019.27.37355.
21. 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.
22. 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.
23. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., 2024. Развитие исследований в области теории проектирования горнотехнических систем и геотехнологий при комплексном освоении недр. *Горный журнал*, № 4, С. 4-8.
24. 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.
25. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., 2022. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений бедных комплексных руд. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 33-43. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.033.
26. Вохмин С.А., Курчин Г.С., Майоров Е.С., 2009. Оценка мест образования потерь ангидрита при камерно-столбовой системе разработки. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5, С. 4-10.
27. Попов Н.И., Иванов А.А., 1979. Снижение потерь отбитой руды при разработке наклонных залежей. *Магадан: Книжное изд-во*, 62 с.
28. Савич И.Н., Мустафин В.И., Лифарь-Лаптев А.А., Яковлев А.М., Сыренов М.О., 2020. Влияние показателей потерь и разубоживания при применении камерной системы разработки с выемкой ромбовидными камерами (в условиях руд средней устойчивости). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № S25, С. 43-57. DOI 10.25018/0236-1493-2020-7-25-43-57.
29. Рыльникова М.В., Корнеев С.А., Мажитов А.М., Корнеева В.С., 2014. Обоснование способов освоения и систем разработки маломощных рудных тел Камаганского медноколчеданного месторождения. *Горный журнал*, № 5, С. 86-90.
30. Барановский К.В., Смирнов А.А., Рожков А.А., Ключев М.В., 2021. Повышение эффективности комбинированной геотехнологии жильных золоторудных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 117-129. DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.
31. Антипин Ю.Г., Рожков А.А., Барановский К.В., 2021. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 15-23. DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23.
32. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Соколов Р.И., 2012. Влияние показателей извлечения на эффективность технологии подземной разработки рудных месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 3, С. 4-11.

References

1. Yakovlev V.L., 2022. Osnovnye etapy i rezul'taty issledovaniy po razrabotke metodologicheskikh osnov strategii razvitiya gornotekhnicheskikh sistem pri osvoenii glubokozalegayushchikh mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [The main stages

and results of research on the development of the methodological foundations of the strategy for the development of mining systems in the development of deep-lying deposits of solid minerals]. *Gornaya pro-myshlennost'*, № S1, P. 34-45. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

2. Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V., 2018. Innovatsionnyi bazis strategii kompleksnogo osvoeniya resursov mineral'nogo syr'ya [The innovative basis of the strategy of integrated development of mineral resources]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN, 360 p., ISBN 978-5-7691-2514-0.

3. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Kamaev V.D., 2002. Vybor sistem podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii . [Selection of underground mining systems for ore deposits]. Otvetstvennyi redaktor prof., d.t.n. Bolikov V.E.. Eka-terinburg: Ural'skoe otделение RAN, 124 p., ISBN 5-7691-1226-X.

4. 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.

5. Lomonosov G.G., Turtygina N.A., 2014. Yavlenie segregatsii rudnoi massy i ego vliyanie na formirovanie kachestva produktsii gornorudnogo proizvodstva [The phenomenon of ore mass segregation and its influence on the formation of the quality of mining products]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 37-40.

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

7. Cheban A.Yu., Sekisov A.G., 2020. Kar'ernyi ekskavator s rabochim oborudovaniem dlya otdeleniya obogashchennoi rudnoi melochi [A quarry excavator with working equipment for separating enriched ore fines]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, Vol. 18, № 1, P. 16-22. DOI 10.18503/1995-2732-2020-18-1-16-22.

8. Pavlov A.M., Semenov Yu.M., 2007. Primenenie vakuumnoi tekhnologii pri zachistke rudy v usloviyakh kriolitozony rudnika "Irokinda" [Application of vacuum technology in ore stripping in the cryolithozone of the Irokinda mine]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 24 - 29.

9. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

10. Agoshkov M.I., 1972. Nauchnye osnovy otsenki ekonomicheskikh posledstviy poter' poleznykh iskopaemykh pri razrabotke mestorozhdenii. [The scientific basis for assessing the economic consequences of mineral losses in the development of deposits]. Moscow: AN SSSR, 149 s.

11. Glotov V.V., Pakhaluev B.G., 2016. Optimizatsiya rasstoyaniya mezhdru stenkami zhelobov pri gidrozachistke vyemochnykh blokov [Optimization of the distance between the gutter walls during hydraulic cleaning of excavation blocks]. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudar-stvennogo universiteta*, Vol. 22, № 4. P. 4-9.

12. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Antipin Yu.G., 2023. Metodicheskii podkhod k obosnovaniyu tekhnologii snizheniya ushcherba ot pereizmel'cheniya rudy pri podzemnoi razrabotke [A 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.

13. 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 low-yield deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S27, P. 12 - 18.

14. Sitnikov R.V., 2010. *Gidromekhanicheskaya zachistka rudnoi melochi - effektivnyi put' snizheniya poter' rudy* [Hydromechanical stripping of ore fines as an effective way to reduce ore losses]. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*, № 2 (59), P. 18-22.

15. Rogiznyi V.F., Khromov V.M., Karpukhina M.V., 2020. *Tekhnologii selektivnoi vyemki malomoshchnykh rudnykh tel s primeneniem malogabaritnogo samokhodnogo oborudovaniya* [Technologies of selective excavation of low-power ore bodies using small-sized self-propelled equipment]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1, P. 34-41.

16. 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.

17. 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.

18. Kaplunov D.R., Yukov V.A., 2013. *K otsenke intensivnosti ekspluatatsii rudnykh mestorozhdenii* [On assessing the intensity of exploitation of ore deposits]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № 1, P. 48-52.

19. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., 2019. *Technology of Blasting of Strong Valuable Ores with Ring Borehole Pattern*. *Journal of Mining Institute*, Vol. 237, P. 285-291. DOI 10.31897/PMI.2019.3.285.

20. Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., 2019. *Issledovanie parametrov tekhnologii podzemnoi dobychi granulirovannogo kvartsa* [Investigation of the parameters of the technology of underground mining of granular quartz]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 123-135. DOI 10.25635/IM.2019.27.37355.

21. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2023. *Parametrizatsiia tekhnologii snizheniia 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, S. 78-82. DOI 10.30686/1609-9192-2023-5-78-82.

22. Zakharov V.N., Ryl'nikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N., 2023. *Gipotezy optimizatsii parametrov funktsionirovaniya gornotekhnicheskikh sistem s primeneniem metodov prognoznoi 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.

23. Zakharov V.N., Kaplunov D.R., 2024. *Razvitie issledovaniia v oblasti teorii proektirovaniya gornotekhnicheskikh sistem i geotekhnologii pri kompleksnom osvoenii nedr* [Development of research in the field of theory of design of mining engineering systems and of geotechnologies in the complex development of mineral resources]. *Gornyi zhurnal*, № 4, P. 4-8.

24. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., 2020. *Modernizatsiya sistemy razrabotki malomoshchnogo mestorozhdeniya bogatykh mednokolchedannykh rud* [Modernization of the development system for a low-yield deposit of rich copper-crushed ores]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii*, Vol. 12, № 3(45), S. 444-453. DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-3-444-453.

25. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., 2022. *Puti povysheniya effektivnosti podzemnoi razrabotki pologikh mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud* [Ways to increase the efficiency of underground mining of shallow deposits of poor complex ores]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 33-43. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.033.

26. Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Maiorov E.S., 2009. Otsenka mest obrazovaniya poter' anhidrita pri kamerno-stolbovoi sisteme razrabotki [Assessment of the sites of formation of anhydrite losses during the chamber-pillar mining system]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 5, P. 4-10.

27. 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.

28. Savich I.N., Mustafin V.I., Lifar'-Laptev A.A., Yakovlev A.M., Syrenov M.O., 2020. Vliyanie pokazatelei poter' i razubozhivaniya pri primenenii kamernoi sistemy razrabotki s vyemkoi rombovidnymi kamerami (v usloviyakh rud srednei ustoichivosti) [The effect of loss and dilution rates when using a diamond-shaped excavation chamber system (in conditions of medium-stability ores)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, № S25, P. 43-57. DOI 10.25018/0236-1493-2020-7-25-43-57.

29. Ryl'nikova M.V., Korneev S.A., Mazhitov A.M., Korneeva V.S., 2014. Obosnovanie sposobov osvoeniya i sistem razrabotki malomoshchnykh rudnykh tel Kamaganskogo mednokolchedannogo mestorozhdeniya [Substantiation of methods of exploitation and systems of development of low-power ore bodies of the Kamagan copper-crusted deposit]. *Gornyi zhurnal*, № 5, P. 86-90.

30. Baranovskii K.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., Klyuev M.V., 2021. Povyshenie effektivnosti kombinirovannoi geotekhnologii zhil'nykh zolotorudnykh mestorozhdenii [Improving the efficiency of combined geotechnology of vein gold deposits]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 117-129. DOI 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.

31. Antipin Yu.G., Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., 2021. Obosnovanie parametrov kamernoi sistemy razrabotki s ostavleniem neizvlekaemykh tselikov [Substantiation of the parameters of the camera system developed with the leaving of non-removable rear sights]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 15-23. DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23.

32. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Sokolov R.I., 2012. Vliyanie pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' tekhnologii podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [The influence of extraction rates on the efficiency of the technology of underground mining of ore deposits]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 3, P. 4-11.