

ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОДГОТОВКИ ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ К ПОСЛЕДУЮЩЕМУ КУЧНОМУ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ

А.Ю. Чебан¹, Т.Г. Конарева¹, Н.М. Литвинова¹, И. Цинь²

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН,
Хабаровск, Россия, e-mail: chebanay@mail.ru

² Хэйлунцзянский университет науки и технологий, Харбин, Китай

Аннотация: Увеличение потребления металлов при одновременном снижении содержания полезного компонента в рудах предопределяет ускоренный рост объемов горных работ, при этом в процессе открытой разработки из недр извлекается также большое количество некондиционных руд, которые в ряде случаев могут содержать в себе существенную часть металла. В статье проводится анализ технологических схем, предполагающих переработку техногенного минерального сырья. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению содержания меди в пробе взорванной некондиционной руды забойной крупности, выявившие возможность вовлечения в переработку продуктивной мелкой фракции, обогащенной полезным компонентом. Авторами предлагается малоотходная, ресурсосберегающая адаптивная технологическая схема открытой разработки крупных месторождений, включающая крупнопорционную сортировку, а также извлечение продуктивной фракции из некондиционного минерального сырья. Перемещение горной массы из карьера осуществляется комбинированным транспортом, при этом выделение продуктивной фракции ведется на усовершенствованном перегрузочном пункте, дополнительно оснащенном вибрационным грохотом, в процессе перевалки условно кондиционной рудной массы из автомобильного на конвейерный транспорт. Полученная продуктивная мелкая фракция перерабатывается с применением кучного выщелачивания с предварительной обработкой растворами высокоактивных окислителей при формировании штабеля. Удаление из техногенного минерального сырья рудной мелочи позволит примерно на четверть уменьшить количество металла, направляемого в штабели вместе с некондиционными рудами, а также снизить отрицательное воздействие горных работ на окружающую среду.

Ключевые слова: медная руда, крупнопорционная сортировка, перегрузочный пункт, грохочение, продуктивная фракция, автосамосвал, конвейер, кучное выщелачивание.

Благодарность: Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

Для цитирования: Чебан А. Ю., Конарева Т. Г., Литвинова Н. М., Цинь И. Обоснование адаптивной технологической схемы подготовки техногенного минерального сырья к последующему кучному выщелачиванию // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 34–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_34.

Justification of adaptive process flow diagram for low-grade mineral resource preparation for heap leaching

A.Yu. Cheban¹, T.G. Konareva¹, N.M. Litvinova¹, Y.F. Qin²

¹ Mining Institute of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia, e-mail: chebanay@mail.ru

² Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, China

Abstract: The increased consumption of metals at the simultaneous decrease of the content of useful components in ore predetermines an incremental increase in the volume and rate of mining operations. Such work also produces much low-grade ore which may contain metals. This study analyzes process flow diagrams meant for processing such low-grade mineral resources. The experimental investigation of copper content in large broken fragments of low-grade ore proved potentiality of processing payable fine fraction rich with useful components. The authors propose a low-waste, resource-saving and adaptive process flow diagram for open pit mining of large ore deposits, with coarse-batch grading and with extraction of payable fine fraction from low-grade mineral raw material. Rock haulage from an open pit is carried out by intermodal transport, and extraction of payable fine fraction is implemented at an improved rehandling point equipped with a jigging screen during reloading of conditionally low-grade ore from dump trucks to conveyors. The produced payable fine fraction is processed by heap leaching with pre-treatment by solutions of high-active oxidizers during heap leach pile formation. Removal of metal-bearing fines from low-grade ore can reduce amount of metal dumping with waste ore approximately by a quarter, and also can mitigate the adverse environmental impact of mining.

Key words: copper ore, coarse-batch grading, rehandling point, screening, payable fraction, dump truck, conveyor, heap leaching.

Acknowledgements: The study was carried out using resources of the Share-Use Center for Scientific Evidence Processing and Storage, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-663.

For citation: Cheban A. Yu., Konareva T. G., Litvinova N. M., Qin Y. F. Justification of adaptive process flow diagram for low-grade mineral resource preparation for heap leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):34-46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_34.

Введение

Известная проблема исчерпания наиболее качественных запасов минерального сырья предопределяет необходимость вовлечения в обработку месторождений или их отдельных участков со все более низким содержанием металла в рудах [1]; так, на Талнахском месторождении за период с 1998 по 2021 гг. среднее содержание меди в руде снизилось с 4,15 до 1,24%, а содержание никеля — с 2,75 до 0,63% [2]. На Гайском месторожде-

нии в 1960-е годы велась добыча богатой руды с содержанием меди 7–9,3%, цинка — 2,4–3,4%, золота — до 3,5 г/т, серебра — до 68 г/т, в настоящее время на предприятии добывается руда со средним содержанием меди 0,96%, цинка — 0,20%, золота — 0,7 г/т, серебра — 4,82 г/т [3]. При этом во всем мире растет потребление металлов; так, согласно данным работы [4], за период с 1987 по 2014 гг. добыча меди увеличилась в 2,85 раза, никеля — в 4,46 раза, свинца — в

2,48 раза, цинка — в 2,72 раза. Снижение содержания полезного компонента в рудах при одновременном увеличении спроса на металлы ведет к ускоренному росту извлечения минерального сырья из недр с образованием огромного количества техногенных отходов. В Российской Федерации за период с 2016 по 2022 гг. количество отходов, образованных в результате деятельности горных предприятий, ведущих разработку металлургических месторождений, увеличилось в 2,5 раза — с 0,96 до 2,4 млрд т [5]. В связи со сложившейся ситуацией развитие горной науки и производства должно обеспечивать все более широкое внедрение новых подходов к добыче и переработке минерального сырья, основанных на соблюдении принципов ресурсосбережения и малоотходности, с вовлечением в переработку техногенного минерального сырья в виде некондиционных руд и минерализованных вмещающих пород, хвостов переработки, шлаков и др. Это позволит не только обеспечить извлечение дополнительного количества полезных компонентов, но и снизить экологическую нагрузку горнодобывающих производств на окружающую среду [1, 6, 7].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Несмотря на то, что за последние десятилетия в связи с развитием техники и технологий горно-обогатительного производства минимальные промышленные содержания металлов в рудах существенно снизились, вместе с техногенными отходами в виде некондиционных руд и минерализованных вмещающих пород в отвалы попадает значительная доля металла месторождений [4, 8]. Необходимо отметить, что техногенные отходы в процессе хранения в отвалах, штабелях, хвостохранилищах и т.п. не только наносят существенный урон окружающей среде,

но в ряде случаев сопровождаются потерей качества сырья в результате длительного хранения на открытом воздухе под воздействием атмосферных осадков и перепадов температур, при этом происходящие изменения вещественного состава и качества неравномерны по глубине и площади техногенных образований [9–11]. Это в дальнейшем зачастую требует дифференцированных подходов к извлечению и переработке сырья различных участков техногенного образования.

В настоящее время для повышения эффективности обработки месторождений в производство внедряются комбинированные технологии, обеспечивающие возможность вовлечения в переработку минерального сырья с относительно низким содержанием полезного компонента [12–15]. Все более широкое применение для переработки бедных и некондиционных руд получает кучное и подземное выщелачивание, что связано с относительно невысокой стоимостью данных процессов в сравнении с обогащением на фабрике [16–18]. Так, в работе [12] предлагается технология, предполагающая использование для сортировки медной руды подземного комплекса, обеспечивающего разделение рудной массы на предконцентрат и хвосты, при этом хвосты в зависимости от содержания в них полезного компонента направляются на кучное или подземное выщелачивание либо на закладку выработанного пространства. Существенным недостатком кучного выщелачивания является значительная длительность процесса; например, при переработке смешанных руд забойной крупности с содержанием меди 0,14–0,32% на Коунрадском руднике в первый сезон выщелачивания, длившийся в течение теплого периода, составлявшего 180 дней, было извлечено 30–35% металла, во второй сезон — 20–25%, в третий — 10–15%. Целе-

сообразность более полного извлечения металла определяется экономическими издержками, поскольку за четвертый сезон из блока извлекается всего 5–10% меди [16]. Во многих случаях для ускорения процесса кучного выщелачивания и повышения извлечения металлов проводится дробление рудной массы, однако это связано с дополнительными издержками.

На многих месторождениях после взрывного рыхления при ведении добычных работ рудная мелочь значительно обогащена металлом, в сравнении с более крупными кусками руды. Так, при исследовании медно-никелевой руды рудника «Заполярный» было выявлено, что с увеличением размера кусков рудной массы с 5 до 300 мм происходит снижение содержания никеля с 0,59 до 0,33%, а меди с 0,75 до 0,45% [19]. Исследование медной руды Коунрадского месторождения показало, что при среднем содержании меди в руде 0,46% обогащенная мелкая фракция –5 мм содержит 0,61% металла, таким образом, степень концентрирования металла в рудной мелочи составляет 1,33 [16]. Анализ состава пробы железных руд Яковлевского месторождения показал, что мелкий класс –25+0 мм имеет содержание металла 46,2% и может быть отнесен к богатым рудам, при этом классы –100+50 и –50+25 мм с содержанием 39,7 и 40,3% соответственно относятся к рядовым рудам, требующим обогащения перед пирометаллургическим (доменным) переделом [20]. При этом вариативность содержания полезного компонента в зависимости от крупности рудной массы характерно как для кондиционных, так и для некондиционных руд; анализ некондиционной рудной массы одного из медно-золоторудных месторождений показал, что рудная мелочь (–10+0 мм) имеет степень концентрирования, равную 1,44 [21]. Таким образом, в ряде случаев в

некондиционной рудной массе присутствует обогащенная продуктивная мелкая фракция, содержание полезного компонента в которой достаточно для рентабельной переработки с применением известных технологий.

Для выделения продуктивных фракций из рудной массы используются специальные грохотильно-перегрузочные пункты, размещаемые в карьере или на отвале, после грохочения кондиционный продукт отправляется на обогащение, а некондиционный — в отвал [22]. Создание и эксплуатация специальных грохотильно-перегрузочных пунктов требует существенных затрат. Известны технико-технологические решения, предусматривающие выделение продуктивной фракции непосредственно в процессе выемки рудной массы экскаватором с просеивающим ковшом [23] или при складировании некондиционных руд с использованием специального агрегата для формирования штабеля [24], при этом необходимо отметить, что просеивание рудной массы в ковше ведет к существенному увеличению времени цикла экскаватора и снижению его производительности, а агрегат для формирования штабеля имеет относительно невысокую эффективность грохочения, в связи с чем значительная часть продуктивной мелкой фракции ссыпается в штабель вместе с надрешетным продуктом и не вовлекается в переработку.

Для перемещения все возрастающих объемов горной массы, извлекаемой из недр, в горное производство при разработке крупных карьеров все шире внедряется комбинированный автомобильно-конвейерный транспорт с перевалкой горной массы на перегрузочных пунктах, что обеспечивает снижение стоимости транспортных работ на 30–40% в сравнении с полностью автомобильными грузоперевозками [25, 26]. В связи с тем, что взорванная горная масса име-

ет в своем составе крупнокусковые включения, транспортировка которых конвейером невозможна, перегрузочные пункты оборудуются дробильным или грохотильно-дробильным оборудованием, обеспечивающим подачу на конвейерную ленту кусков необходимой крупности. Комбинированным транспортом преимущественно ведется перемещение пустых пород и некондиционных руд, составляющих основную часть грузопотока карьера. Необходимо отметить, что известные конструкции дробильно-грохотильных перегрузочных пунктов не обеспечивают возможности выделения из транспортируемого потока продуктивной мелкой фракции.

Целью работы является проведение исследований по обоснованию возможности повышения эффективности освоения крупных металлорудных месторождений за счет внедрения адаптивной технологической схемы с крупнопорционной сортировкой, извлечением продуктивной фракции из некондиционного минерального сырья при его перевалке на усовершенствованном грохотильно-дробильном перегрузочном пункте карьера в процессе транспортировки автомобильно-конвейерным транспортом и последующей подготовки полученного сырья к кучному выщелачиванию.

Результаты исследования

Предлагаемая адаптивная технологическая схема подготовки части техногенного минерального сырья к последующему кучному выщелачиванию может быть использована при освоении крупных сложноструктурных месторождений цветных металлов, для которых характерно существенное обогащение мелких фракций взорванной рудной массы полезным компонентом.

Проведенные с участием авторов экспериментальные исследования по определению содержания меди в пробе взорванной некондиционной руды забойной крупности одного из дальневосточных месторождений, фракционированной по классам, показали значительную вариативность содержания металла, при этом мелкие классы ($-20+10$, $-10+5$ и $-5+0$ мм) имеют повышенное содержание полезного компонента, достаточное для обеспечения рентабельной переработки минерального сырья (рис. 1).

Объединенная продуктивная фракция ($-20+0$ мм), составляющая по массе 26,7%, имеет содержание меди 0,410 у.е. при среднем содержании металла в пробе, равном 0,315 у.е., таким образом, степень концентрирования металла в продуктивной фракции равна 1,30. На рассматриваемом месторождении в штабель



Рис. 1. Содержание меди во взорванной некондиционной руде по классам крупности

Fig. 1. Copper content in blasted substandard ore by size classes

некондиционной руды направляется рудная масса с содержанием меди 0,1... 0,4 у.е., при этом среднее содержание металла в некондиционной руде составляет всего 0,255 у.е., в связи с чем в случае выделения мелкой обогащенной полезным компонентом фракции $-20+0$ мм из всего объема некондиционных руд среднее содержание меди в мелкой фракции составит порядка 0,33 у.е., что недостаточно для ее рентабельной переработки

с применением кучного выщелачивания. Поэтому выделение продуктивной фракции целесообразно вести из некондиционной рудной массы с содержанием меди 0,25... 0,40 у.е.

Вовлечение в переработку дополнительного объема минерального сырья, получаемого за счет выделения продуктивной мелкой фракции из части некондиционной руды, возможно с применением адаптивной схемы добычи и

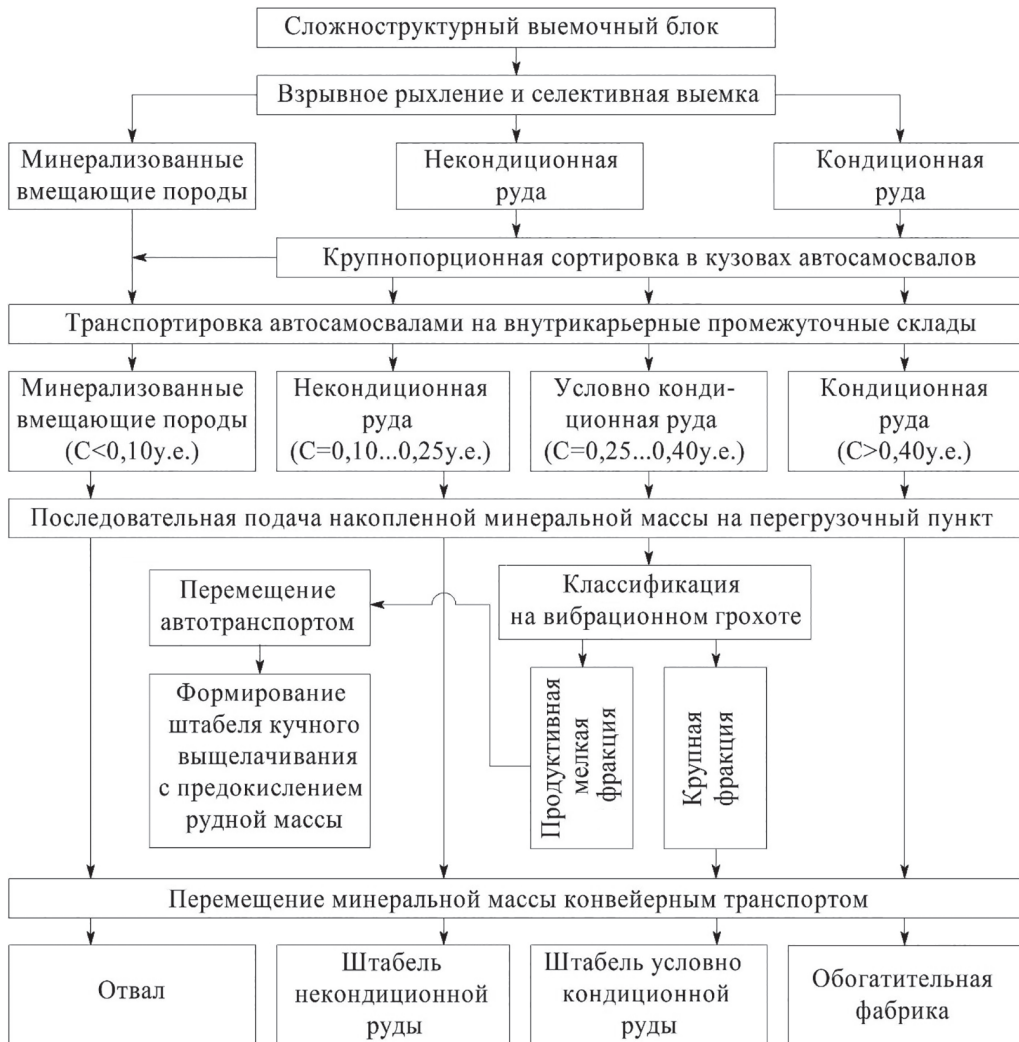


Рис. 2. Адаптивная схема добычи и переработки руд сложноструктурного выемочного блока

Fig. 2. Adaptive scheme of mining and processing of ores of a complex-structured mining block

переработки, представленной на рис. 2. После осуществления взрывного рыхления сложноструктурного выемочного блока ведется селективная выемка кондиционных и некондиционных руд, а также минерализованных вмещающих пород одноковшовыми экскаваторами. В связи с тем, что в структуре выемочных блоков имеются участки сложного строения с чередованием кондиционных и некондиционных руд, а также изменением структуры блока после проведения взрыва, обеспечение качественной селективной выемки с применением крупного карьерного оборудования невозможно, следовательно, неизбежна существенная пересортица и разубоживание рудной массы. Обеспечить оперативное опробование значительных объемов рудной массы при относительно небольших капитальных и эксплуатационных затратах позволяет система крупнопорционной сортировки в транспортных емкостях с разделением руд по сортам и выделением минерализованных вмещающих пород, что дает возможность увеличить выпуск готовой продукции без наращивания дополнительных перерабатывающих мощностей, а также расширить минерально-сырьевую базу предприятия.

Комплексы регистрирующей аппаратуры позволяют опробовать порции руд с порогом определения меди и никеля по 0,1%, кобальта — 0,05%, олова — 0,015%, вольфрама — 0,04%, в результате сортировки из потока исходной рудной массы удаляется до 25% некондиционных включений [27].

Автосамосвалы с кондиционной и некондиционной рудой от забоя направляются к рудоконтрольной станции, где уточняется содержание металла в транспортируемой рудной массе по трем пороговым значениям (0,40, 0,25 и 0,10 у.е.) с выделением кондиционной руды с содержанием меди более 0,4 у.е., ус-

ловно кондиционной руды — 0,25 — 0,40 у.е., некондиционной руды — 0,10 — 0,25 у.е., и минерализованных вмещающих пород. На перегрузочном пункте осуществляется перевалка руд и минерализованных вмещающих пород для их последующей транспортировки конвейером на дневную поверхность. Усовершенствованный перегрузочный пункт автомобильно-конвейерного транспорта оснащен грохотильно-дробильным оборудованием для предварительного выделения на классификаторе транспортных для ленточного конвейера фракций (–300... 400 мм) с направлением крупнокускового материала на дробление [25]. Также перегрузочный пункт снабжен дополнительным оборудованием для выделения из условно кондиционной руды продуктивной мелкой фракции (рис. 3), включающим вибрационный грохот 1, аккумулирующий бункер 2, рудоскат 3, установленные на опорной раме 4 перегрузочного пункта.

При осуществлении разгрузки условно кондиционной рудной массы на колосники 5 напрямую из автосамосвала или из ковша погрузчика, обслуживающего внутрикарьерные промежуточные склады, крупнокусковая рудная масса 6 (+300... 400 мм) в качестве надрешетного продукта поступает в приемный бункер 7 дробилки (рис. 3, а). Просеиваясь через колосники 5 руда попадает на вибрационный грохот 1 для повышения эффективности грохочения, снабженный набором просеивающих поверхностей, с которых среднекусковая рудная масса 8 (+20 мм) ссыпается на рудоскат 3 и далее в накопительный бункер, куда также попадает рудная масса после дробилки (на рис. 3 не показан). В качестве подрешетного продукта на виброгрохоте 1 выделяется продуктивная мелкая фракция 9 (–20 мм), ссыпаящаяся в аккумулирующий бункер 2 и далее в автотранспортное средство, перемещающее

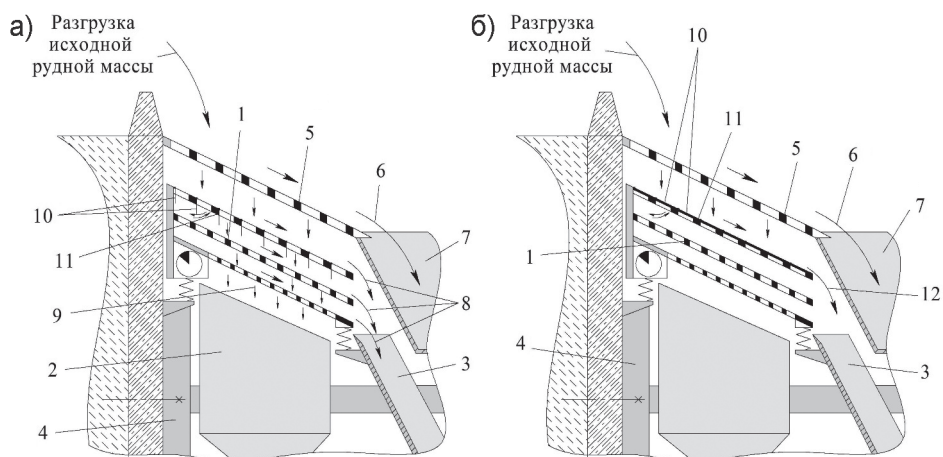


Рис. 3. Схема работы грохотильного оборудования перегрузочного пункта: с выделением продуктивной мелкой фракции (а); без выделения продуктивной мелкой фракции (б)

Fig. 3. Scheme of operation of screening equipment of the transfer point: with separation of productive fine fraction (a); without separation of productive fine fraction (b)

дополнительно полученное минеральное сырье к участку кучного выщелачивания, где посредством консольного штабелюкладчика ведется формирование штабеля с одновременной обработкой отсыпаемой рудной массы специальным раствором для ее окисления, содержащим гидратированные формы активного кислорода [28, 29]. В процессе выдерживания в штабеле обработанная таким раствором руда окисляется, что обеспечивает возможность извлечения из нее меди на уровне 60 – 70%, при этом крупность кусков рудной массы до 20 мм позволяет извлечь большую часть полезного компонента за один теплый сезон.

При подаче на перегрузочный пункт кондиционной руды, некондиционной руды с содержанием металла 0,10... 0,25 у.е. или минерализованных вмещающих пород поворотные заслонки 10 верхней просеивающей поверхности 11 закрываются, и весь подрешетный продукт 12 (–300... 400 мм), выделенный на колосниках 5, напрямую направляется по рудоскату 3 (рис. 3, б) в накопительный бункер.

Из накопительного бункера через питатель минеральная масса конвейерным транспортом перемещается к месту разгрузки: кондиционная руда – на обогатительную фабрику; крупная фракция

Параметры минеральной массы, извлекаемой из выемочного блока

Parameters of the mineral mass extracted from the extraction block

Минеральная масса	Содержание металла, у.е.	Доля минеральной массы, %	Среднее содержание металла, у.е.	Доля металла в руде, %
Кондиционная руда	более 0,40	57,1	0,718	82,4
Некондиционная руда	0,25 – 0,40	21,4	0,321	13,8
	0,10 – 0,25	12,5	0,154	3,8
Минерализованные вмещающие породы	–	9,0	–	–
Итого	–	100,0	–	100,0

условно кондиционной руды и некондиционная руда — в соответствующие штабели; минерализованные вмещающие породы — в отвал (см. рис. 2). При этом перед отсыпкой штабеля с условно кондиционной рудой проводится подготовка основания и другие работы для того, чтобы по мере окисления рудной массы в результате естественных процессов впоследствии возможно было вести отвальное выщелачивание.

В таблице приведены параметры извлекаемых руд одного из сложноструктурных выемочных блоков рассматриваемого месторождения.

В случае применения традиционной технологии некондиционная руда, в которой находится более 17% металла, содержащегося в выемочном блоке, в полном объеме отправляется на склад некондиционной руды, поскольку среднее содержание меди 0,259 у.е. не позволяет обеспечить возможность рентабельной переработки данного минерального сырья. Применение предлагаемой технологии позволит вовлечь в переработку дополнительный объем руды. Количество металла, содержащегося в продуктивной мелкой фракции, может быть определено по следующей зависимости:

$$q_{\text{пм}} = q_{\text{ук}} k_{\text{пм}} k_{\text{об}} E \cdot 10^{-2},$$

где $q_{\text{ук}}$ — доля металла, содержащегося в условно кондиционной руде выемочного блока; $k_{\text{пм}}$ — выход по массе продуктивной мелкой фракции из условно кондиционной руды, %; $k_{\text{об}}$ — степень концентрирования металла в продуктивной мелкой фракции; E — общая эффективность грохочения при выделении продуктивной мелкой фракции, определяемая согласно рекомендациям [30].

С учетом того, что в условно кондиционной руде находится 13,8% металла, содержащегося в выемочном блоке (см. таблицу), при выходе по массе продуктивной фракции 26,7%, коэффициенте

обогащения продуктивной мелкой фракции 1,30 и общей эффективности грохочения, равной 0,83, в продуктивной мелкой фракции будет находиться 4,0% металла, содержащегося в выемочном блоке. Таким образом, доля металла, содержащегося в складываемых некондиционных рудах, сократится с 17,6 до 13,6%.

Заключение

Предлагаемый подход к решению некоторых проблем, связанных с вовлечением в переработку низкосортных руд крупного месторождения меди, позволит увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр.

В частности, крупнопорционная сортировка разносортных руд в кузовах автосамосвалов обеспечит повышение качества минерального сырья, направляемого на фабрику, а также даст возможность выделить в транспортном потоке автосамосвалы с условно кондиционной рудой.

Использование комбинированного автомобильно-конвейерного транспорта даст возможность не только уменьшить затраты на транспортировку минерального сырья, но и обеспечить выделение из условно кондиционных руд продуктивной мелкой фракции непосредственно в процессе перевалки на усовершенствованном перегрузочном пункте, что позволит почти на четверть уменьшить количество металла, теряемого вместе с некондиционной рудной массой.

Выделенная продуктивная мелкая фракция перерабатывается с применением кучного выщелачивания с предварительной обработкой растворами высокоактивных окислителей при формировании штабеля. Извлечение из условно кондиционных руд основного объема рудной мелочи позволит существенно снизить пыление при формировании штабеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubetskoi K. N., Zakharov V. N., Galchenko Y. P.* Naturelike and convergent technologies for developing lithosphere mineral resources // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020, vol. 90, no. 3, pp. 332 – 337. DOI: 10.1134/S1019331620030065.
2. *Горбачева В. Д., Чмыхалова С. В.* Оценка качества медно-никелевых руд Талнахского месторождения // Горный журнал. – 2023. – № 6. – С. 68 – 72. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.09.
3. *Барденцев В. С., Ефимов Н. И., Нестеренко Д. В., Лаптев М. В.* Особенности отработки Гайского месторождения медноколчеданных руд // Горный журнал. – 2024. – № 5. – С. 14 – 21.
4. *Оганесян Л. В., Мирлин Е. Г.* Проблема исчерпания минерально-сырьевых ресурсов земной коры // Горная промышленность. – 2019. – № 6. – С. 100 – 105. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-148-100-105.
5. *Олейник Д. Н., Рыльникова М. В., Швабенланд Е. Е.* Совершенствование правовых основ управления отходами недропользования в России // Рациональное освоение недр. – 2024. – № 6. – С. 24 – 35. DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.001.
6. *Мельниченко И. А., Кириченко Ю. В.* Разработка метода районирования техногенных массивов // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 116 – 122. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-116-122.
7. *Чебан А. Ю., Литвинова Н. М., Конарева Т. Г., Рассказов М. И., Терешкин А. А.* Совершенствование технологий выемки и предварительной переработки контрастных руд при освоении сложноструктурных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 28 – 40. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_28.
8. *Zhang Z. X., Hou D. F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y.* World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production // International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2021, vol. 35, no. 6, pp. 670 – 691. DOI: 10.1080/17480930.2021.1949878.
9. *Mhlongo S. E., Amponsah-Dacosta F., Kadyamatimba A.* Development and application of a methodological tool for prioritization of rehabilitation of abandoned tailings dumps in the Giyani and Musina areas of South Africa // Cogent Engineering. 2019, vol. 6, article 1619894. DOI: 10.1080/23311916.2019.1619894.
10. *Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Цупкина М. В.* Оценка влияния гипергенеза в хранилищах отходов переработки медно-колчеданных руд на выбор технологических схем их разработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 2. – С. 283 – 299.
11. *Masloboev V. A., Seleznev S. G., Makarov V. D., Svetlov A. V.* Assessment of the environmental hazard of storing waste from mining and processing copper-nickel ores // Journal of Mining Science. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 559 – 572. DOI: 10.1134/S106273911403017X.
12. *Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В.* Перспективные направления развития комбинированной геотехнологии в свете совершенствования технологического уклада горного производства // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 7 – 22.
13. *Robben C., Wotruba H.* Sensor-based ore sorting technology in mining-past, present and future // Minerals. 2019, vol. 9, no. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.
14. *Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchuk M. S., Vasyanov Y. A.* Stage-activation leaching of oxidized copper-gold ore: theory and technology // Eurasian Mining. 2020, no. 1, pp. 52 – 55. DOI: 10.17580/em.2020.01.10.
15. *Robertson S. W., Van Staden P. J., Cherkaev A., Petersen J.* Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching // Hydrometallurgy. 2022, vol. 208, pp. 1 – 17. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105811.
16. *Халезов Б. Д.* Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 352 с.
17. *Валиев Н. Г., Разоренов Ю. И., Голик В. И., Лебзин М. С.* Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 33 – 43. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
18. *Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X.* The selective chlorination of nickel and copper from low grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics // Separation and Purification Technology. 2020, vol. 239, article 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577.
19. *Ломоносов Г. Г., Туртыгина Н. А.* Влияние класса крупности медно-никелевого рудного сырья и его изменчивости на показатели обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 3. – С. 104 – 107.

20. Шибяева Д. Н., Компанченко А. А. Оценка обогатимости железных руд Яковлевского месторождения Курской магнитной аномалии методами крупнокусковой сепарации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 6. — С. 117–129. DOI: 10.15372/FTPRPI20230611.

21. Чебан А. Ю., Литвинова Н. М., Богомяков Р. В., Кирильчук М. С. Расширение сырьевой базы рудников посредством концентрирования мелких фракций некондиционных руд // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 2. — С. 15–19. DOI: 10.56195/20793332_2023_2_15_19.

22. Кантемиров В. Д., Титов Р. С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 3. — С. 107–114. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-107-114.

23. Увеличение продуктивности рудника экономически эффективным методом с помощью ALLU // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 68–69.

24. Чебан А. Ю. Технология складирования некондиционных руд с выделением продуктивных мелких фракций // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 1. — С. 388–398.

25. Лашко В. Т. Перегрузочные пункты при автомобильно-конвейерном транспорте на рудных карьерах. — Днепропетровск: Полиграфист, 2001. — 140 с.

26. Minkin A., Wolpers F. M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls // Bulk Solids Handling. 2019, vol. 37, no. 2, pp. 18–23.

27. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining-past, present and future // Minerals. 2019, vol. 9, no. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.

28. Секисов А. Г., Рассказова А. В., Конарева Т. Г. Кучное выщелачивание первичных и смешанных комплексных медных руд с использованием активационного преокисления // Горный журнал. — 2024. — № 6. — С. 71–76. DOI: 10.17580/gzh.2024.06.11.

29. Krylova L. N. Efficiency of ozone application for extraction of metals from mineral raw materials // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2022, vol. 63, no. 3, pp. 247–255. DOI: 10.3103/S1067821222030087.

30. Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г. и др. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке. — М.: Недра, 1987. — 308 с. **МИАЭ**

REFERENCES

1. Trubetskoi K. N., Zakharov V. N., Galchenko Y. P. Naturelike and convergent technologies for developing lithosphere mineral resources. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020, vol. 90, no. 3, pp. 332–337. DOI: 10.1134/S1019331620030065.

2. Gorbacheva V. D., Chmykhalova S. V. The quality control of copper-nickel ores of the Talnakh deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 6, pp. 68–72. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.09.

3. Bardentsev V. S., Efimov N. I., Nesterenko D. V., Laptev M. V. Features of development of the Gai deposit of copper-pyrite ores. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 5, pp. 14–21. [In Russ].

4. Oganessian L. V., Mirlin E. G. Issues of resource depletion in earth crust. *Russian Mining Industry Journal*. 2019, no. 6, pp. 100–105. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-148-100-105.

5. Oleynik D. N., Rylnikova M. V., Shvabenland E. E. Improving the legal framework for the mining wastemanagement in Russia. *Mineral mining & conservation*. 2024, no. 6, pp. 24–35. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.001.

6. Melnichenko I. A., Kirichenko Yu. V. Development of zoning method for man-made massifs. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 3, pp. 116–122. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-116-122.

7. Cheban A. Yu., Litvinova N. M., Konareva T. G., Rasskazov M. I., Tereshkin A. A. Improvement of pretreatment and extraction technologies for contrast ore in mining structurally complex deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 12, pp. 28–40. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_28.

8. Zhang Z. X., Hou D. F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2021, vol. 35, no. 6, pp. 670–691. DOI: 10.1080/17480930.2021.1949878.

9. Mhlongo S. E., Amponsah-Dacosta F., Kadyamatimba A. Development and application of a methodological tool for prioritization of rehabilitation of abandoned tailings dumps in the Giyani and Musina areas of South Africa. *Cogent Engineering*. 2019, vol. 6, article 1619894. DOI: 10.1080/23311916.2019.1619894.
10. Rylnikova M. V., Radchenko D. N., Tsupkina M. V. Evaluation of the influence of hypergenesis during storage of waste of enhancement of copper pyrite ores on the choice of technological schemes of their development. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 2, pp. 283–299. [In Russ].
11. Masloboev V. A., Seleznev S. G., Makarov V. D., Svetlov A. V. Assessment of the environmental hazard of storing waste from mining and processing copper-nickel ores. *Journal of Mining Science*. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 559–572. DOI: 10.1134/S106273911403017X.
12. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. Perspective directions of development of combined geotechnology in view of improvement of technological way of mining production. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019, no. 3, pp. 7–22. [In Russ].
13. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining-past, present and future. *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.
14. Rasskazova A. V., Sekisov A. G., Kirilchuk M. S., Vasyanov Y. A. Stage-activation leaching of oxidized copper-gold ore: theory and technology. *Eurasian Mining*. 2020, no. 1, pp. 52–55. DOI: 10.17580/em.2020.01.10.
15. Robertson S. W., Van Staden P. J., Cherkaev A., Petersen J. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022, vol. 208, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105811.
16. Khalezov B. D. *Kuchnoe vyshchelachivanie mednykh i medno-tsinkovykh rud* [Heap leaching of copper and copper-zinc ores], Ekaterinburg, RIO UrO RAN, 2013, 332 p.
17. Valiev N. G. O., Razorenov Yu. I., Golik V. I., Lebzin M. S. Combination of leaching technologies with conventional ore processing techniques. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 4, pp. 33–43. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
18. Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X. The selective chlorination of nickel and copper from low grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. *Separation and Purification Technology*. 2020, vol. 239, article 116577. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116577.
19. Lomonosov G. G., Turtygina N. A. Influence of coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the beneficiation indication. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 104–107. [In Russ].
20. Shibaeva D. N., Kompanchenko A. A. Preparability of iron ore from Yakovlevo deposit, Kursk Magnetic Anomaly, using coarse particle separation methods. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2023, no. 6, pp. 117–129. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230611.
21. Cheban A. Yu., Litvinova N. M., Bogomyakov R. V., Kirilchuk M. S. Expanding the raw material base of mines through the concentration of small fractions of sub-conditional ores. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023, no. 2, pp. 15–19. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332_2023_2_15_19.
22. Kantemirov V. D., Titov R. S. Optimization of parameters of open-pit screening and dumping stations. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 3, pp. 107–114. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-107-114.
23. Increasing mine productivity by a cost-effective method using ALLU. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 68–69. [In Russ].
24. Cheban A. Yu. Technology for storage of sub-specific ores with separation of productive fine fractions. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 1, pp. 388–398. [In Russ].
25. Lashko V. T. *Pereguzochnnye punkty pri avtomobil'no-konveyernom transporte na rudnykh kar'erakh* [Transfer points for automobile-conveyor transport in ore quarries], Dnepropetrovsk, Poligrafist, 2001, 140 p.
26. Minkin A., Wolpers F. M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls. *Bulk Solids Handling*. 2019, vol. 37, no. 2, pp. 18–23.
27. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining-past, present and future. *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 9, article 523. DOI: 10.3390/min9090523.

28. Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Konareva T. G. Heap leaching of primary and complex copper ore with activation pre-oxidation. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 6, pp. 71–76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.06.11.

29. Krylova L. N. Efficiency of ozone application for extraction of metals from mineral raw materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2022, vol. 63, no. 3, pp. 247–255. DOI: 10.3103/S1067821222030087.

30. Revnivitsev V. I., Azbel' E. I., Baranov E. G. *Podgotovka mineral'nogo syr'ya k obogashcheniyu i pererabotke* [Preparation of mineral raw materials for enrichment and processing], Moscow, Nedra, 1987, 308 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чебан Антон Юрьевич*¹ — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,

e-mail: chebanay@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*Конарева Татьяна Геннадьевна*¹ — научный

сотрудник, e-mail: konar_tat@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,

*Литвинова Наталья Михайловна*¹ — канд. техн. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: nauka22@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8199-1605,

Ифен Цинь — аспирант, Хэйлунцзянский университет

науки и технологий, e-mail: qyf18852935131@126.com,

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.

Для контактов: Чебан А.Ю., e-mail: chebanay@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A. Yu. Cheban*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Leading Researcher,

e-mail: chebanay@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*T.G. Konareva*¹, Researcher,

e-mail: konar_tat@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9889-3721,

*N.M. Litvinova*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Leading Researcher, e-mail: nauka22@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8199-1605,

Y.F. Qin, Graduate Student,

Heilongjiang University of Science and Technology,

Harbin, China, e-mail: qyf18852935131@126.com,

¹ Mining Institute of Far East Branch

of the Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.

Corresponding author: A. Yu. Cheban, e-mail: chebanay@mail.ru.

Получена редакцией 12.09.2024; получена после рецензии 05.11.2024; принята к печати 10.03.2025.

Received by the editors 12.09.2024; received after the review 05.11.2024; accepted for printing 10.03.2025.

