

УДК 622.271:622.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821
Шифр специальности ВАК: 25.00.22
Научная статья

Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой схемы управления качеством руд при их транспортировке

А.Ю. Чебан✉

Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, г. Хабаровск

✉ chebanay@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Ухудшение качества минерально-сырьевой базы предопределяет необходимость освоения сложноструктурных месторождений с относительно низким содержанием металла в рудах, в результате чего непрерывно возрастают объемы горных работ, при этом в процессе ведения открытой добычи из недр извлекается и складировается большое количество некондиционных руд, в которых в ряде случаев содержится существенная доля запасов металла месторождения. **Цель.** Повышение эффективности ведения открытой разработки крупных золоторудных месторождений путем извлечения продуктивных фракций из некондиционного минерального сырья с применением технико-технологического решения, обеспечивающего гибкое управление качеством вовлекаемых в переработку руд. **Объект.** Некондиционное минеральное сырье одного из золоторудных месторождений. **Результаты и выводы.** В процессе экспериментальных исследований установлено, что в пробах взорванной некондиционной рудной массы содержание золота в мелких классах (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) в 1,38–2,30 раза превышает среднее содержание золота в пробах, в связи с чем данные классы после выделения из рудной массы можно рентабельно перерабатывать вместе с кондиционной бедной рудой посредством кучного выщелачивания. Предложена схема добычи и переработки минеральной массы сложноструктурного выемочного блока с гибким управлением качеством руд при их транспортировке, заключающаяся в крупнопорционной сортировке руды в автосамосвалах и последующем выделении из некондиционной руды с различным содержанием полезного компонента продуктивных фракций рационального размера. Выделение продуктивных фракций осуществляется на усовершенствованном грохотильно-дробильном перегрузочном пункте в процессе перемещения руд автомобильно-конвейерным транспортом. Проведенные расчеты применительно к одному из выемочных блоков рассматриваемого золоторудного месторождения показали, что реализация предлагаемой технологической схемы позволит дополнительно вовлечь в переработку рудную массу, содержащую 7,3 % извлекаемого из недр металла, что в 1,62 раза уменьшит потери золота со складироваемыми некондиционными рудами.

Ключевые слова: некондиционная руда, продуктивные фракции, содержание металла, комбинированный транспорт, перегрузочный пункт, грохочение, кучное выщелачивание

Для цитирования: Чебан А.Ю. Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой схемы управления качеством руд при их транспортировке // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 116–124. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821

UDC 622.271:622.7
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821
Scientific paper

Improving the efficiency of gold ore deposit development by using a flexible ore quality management scheme during their transportation

A.Yu. Cheban✉

Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

✉ chebanay@mail.ru

Abstract. Relevance. The deterioration of the quality of the mineral resource base predetermines the need to develop complex-structured deposits with a relatively low metal content in the ores. As a result the volume of mining operations is continuously increasing, while in the process of open-pit mining a large amount of substandard ores are extracted from the subsoil and stored, which in some cases contain a significant share of the deposit metal reserves. **Aim.** Improving the efficiency of open-pit mining at large gold ore deposits by extracting fine ore from substandard mineral raw materials using an innovative solution that provides flexible quality management of ores involved in processing. **Object.** Substandard mineral raw materials from one of the gold ore deposits. **Results and conclusions.** It was established that in the samples of blasted substandard ore mass the gold content in small classes ($-15+10$, $-10+5$ and $-5+0$ mm) is 1.38–2.30 times higher than the average gold content in the samples. In this relation these classes after separation from the ore mass can be profitably processed together with standard poor ore by means of heap leaching. The article proposes a scheme for the extraction and processing of mineral mass from a complex-structured mining block with flexible control of ore quality during transportation, consisting of large-portion sorting of ore in dump trucks and subsequent separation of productive fractions of rational size from substandard ore with different contents of useful components. The separation of productive fractions is carried out at an improved screening and crushing transfer point during ore moving by automobile and conveyor transport. The calculations carried out for one of the extraction blocks of the gold ore deposit under consideration showed that the implementation of the proposed technological scheme will allow additional involvement in processing of the ore mass containing 7.3% of the metal extracted from the subsoil, which will reduce gold losses with stored substandard ores by 1.62 times.

Keywords: substandard ore, productive fractions, metal content, combined transport, transfer point, screening, heap leaching

For citation: Cheban A.Yu. Improving the efficiency of gold ore deposit development by using a flexible ore quality management scheme during their transportation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 116–124. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4821

Введение

Добыча полезных ископаемых является важной составляющей экономики многих регионов Российской Федерации. Так, в отраслевой структуре валового регионального продукта в Дальневосточном федеральном округе добыча полезных ископаемых составляет более 27 %, превышая в ряде регионов уровень 40 % [1]. Интенсивная отработка месторождений с наиболее богатыми рудами привела к снижению качества оставшихся запасов. Так, в РФ за период с 1991 по 2012 гг. в доказанных запасах среднее содержание золота снизилось с 4,3 до 2,4 г/т [2]. Однако благодаря благоприятной конъюнктуре и внедрению новых технологий появилась возможность вовлечь в отработку запасы с относительно невысоким содержанием металла в руде [3–5]. За последние годы добыча золота в России значительно увеличилась. Так, только в дальневосточных регионах его производство возросло с 127,3 т в 2014 г. до 192,8 т в 2021 г. [1]. Снижение содержания полезного компонента в рудах при одновременном увеличении спроса на металлы предопределяет многократный рост объемов извлекаемой из недр горной массы, в которой основную долю составляют техногенные отходы в виде вскрышных и вмещающих пород, а также некондиционных руд. В Российской Федерации с 2016 по 2022 гг. количество техногенных отходов, ежегодно образуемых в результате деятельности горных предприятий, ведущих разработку металлорудных месторождений, увеличилось с 0,96 до 2,4 млрд т [6]. Таким образом, в настоящее время расширение минерально-сырьевой базы и возможность рентабельной отработки месторождений при перманентно ухудшающихся горно-

технических и горно-геологических условиях должно обеспечиваться за счет внедрения усовершенствованных малоотходных энергоэффективных технологий с комплексной переработкой разносортного минерального сырья, включая некондиционную рудную массу [7–11].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Наибольшее количество техногенных отходов в виде вскрышных и минерализованных вмещающих пород, а также некондиционной рудной массы образуется в результате деятельности предприятий, ведущих разработку месторождений открытым способом. Так, на карьере Светлинский из 22,2 млн м³ извлекаемой горной массы техногенные отходы составляют 17,8 млн м³, а на карьере Курасан из 12,0 млн м³ – 10,8 млн м³ [12]. Необходимо отметить, что в ряде случаев складированные некондиционные руды содержат значительную долю металла месторождения [12–15]. Кроме того, сложная структура отдельных выемочных блоков, интенсивное переслаивание включений кондиционных руд малой мощности с некондиционными рудами и вмещающими породами не позволяют селективно извлечь такие запасы с сохранением их природного качества. В результате происходит значительное разубоживание кондиционных руд, и они вынужденно складировываются вместе с техногенными отходами, при этом объем теряемого таким образом кондиционного сырья может достигать десятков процентов [5, 6]. Вовлечь в переработку бедные и некондиционные руды позволяет использование комбинированных технологических схем, предпо-

лагающих применение таких низкозатратных способов, как кучное или отвальное выщелачивание. Организация производственных процессов по извлечению благородных и цветных металлов из бедных руд и ранее некондиционного минерального сырья актуальна для многих стран [16–19].

Снизить потери кондиционного сырья и улучшить его качество за счет выделения некондиционных руд и пустых пород позволяет крупнопорционная сортировка на рентгенорадиометрических контрольных автомобильных станциях. Крупнопорционная сортировка при относительно небольших капитальных и эксплуатационных затратах может обеспечить контроль качества больших объемов рудной массы. 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 % [20]. Так, на карьере Инкур крупнопорционная сортировка руды со средним содержанием WO_3 , равным 0,147 %, позволила выделить 41 % товарной руды (0,20 % WO_3) и 59 % некондиционной руды (0,08 % WO_3), направленной в специальный штабель [21]. Использование на карьере Мурунтау крупнопорционной сортировки забалансовых золотосодержащих руд позволило выделить из некондиционного потока около 25 % товарных руд, обогащенных металлом в 1,5 раза, что существенно уменьшило потери металла с техногенными отходами [22]. При этом в процессе крупнопорционной сортировки для регистрирующей аппаратуры может устанавливаться несколько граничных значений содержания полезного компонента в руде (пороги сортировки). Так, на золоторудном месторождении Кокпатас при разработке сложноструктурных выемочных блоков поток забалансовой руды разделялся на три продукта по двум порогам сортировки: кондиционная руда с содержанием золота выше 0,7 г/т; некондиционная руда – 0,45–0,7 г/т; минерализованные вмещающие породы – менее 0,45 г/т [23]. Проведенные на предприятии исследования позволили установить, что при сортировке всей добываемой руды выпуск золота на фабрике увеличится на 6,7 % при снижении на 3 % количества подаваемой на фабрику руды, кроме того, объем накапливаемых некондиционных руд сократится более чем на 40 %.

Для многих руд характерно образование в процессе взрывного рыхления мелкой фракции, существенно обогащенной полезным компонентом (в 1,5–3 раза) в сравнении со средним содержанием металла в рудной массе [24]. Таким образом, в некондиционной руде может находиться продуктивная мелкая фракция с содержанием металла достаточным для ее рентабельной переработки. Выделение продуктивных фракций из рудной массы ведется на грохотильно-перегрузочных пунктах, также известны схемы просеивания обогащенной рудной мелочи посредством специального оборудова-

ния при формировании штабелей и отвалов с применением автосамосвалов [24–26]. Необходимо отметить, что использование данных технологических схем ведет к усложнению процесса и повышению затрат в связи с перегрузочными работами, требует использования дополнительного оборудования и персонала, это снижает положительный эффект от вовлечения в переработку полученных продуктивных фракций, кроме того, полностью автомобильная транспортировка всего объема горной массы на крупных карьерах может быть экономически нецелесообразной.

Дополнительно повысить эффективность добычи при больших объемах горных работ и достижениях карьером определенной глубины можно путем перехода с автомобильного на автомобильно-конвейерный транспорт, что позволяет на 30–40 % уменьшить себестоимость перемещения горной массы и до двух раз увеличить производительность труда [27–29]. С применением комбинированных схем транспортировки перемещаются как вскрышные породы, так и руда, например, на карьере Мурунтау (Узбекистан). В дополнение к породному потоку конвейерная линия используется для транспортирования из карьера и складирования в отдельном ярусе конвейерного отвала забалансовой руды. Одновременно на внутрикарьерных промежуточных складах было организовано накапливание руды с последующей «залповой» ее отгрузкой в поточный комплекс. Доля комбинированного транспорта в общем грузопотоке карьера составляет по разным годам 50–65 %, а в общем грузопотоке вскрыши – 70–85 % [30].

Целью работы является повышение эффективности ведения открытой разработки крупных золоторудных месторождений путем извлечения продуктивных фракций из некондиционного минерального сырья с применением технико-технологического решения, обеспечивающего гибкое управление качеством вовлекаемых в переработку руд.

Экспериментальная часть

В Центре коллективного пользования Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук с участием автора были проведены экспериментальные исследования двух проб некондиционной рудной массы забойной крупности одного из дальневосточных золоторудных месторождений, фракционированной по классам крупности. Содержание металла в полученных при рассеивании классах устанавливалось атомно-абсорбционным методом с применением спектрофотометра AA-7000 Shimadzu (Япония). Исследования показали значительную вариативность содержания металла, при этом мелкие классы (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) существенно обогащены полезным компонентом, а более крупные куски

руды имеют содержание металла ниже среднего (рис. 1). Содержание металла в мелких классах превышает средний показатель в 2,22–2,30, 1,56–1,68 и 1,32–1,38 раза соответственно для фракций –5+0, –10+5 и –15+10 мм. В пробе № 1 к кондиционному по содержанию полезного компонента (более 0,7 г/т) можно отнести классы крупности рудной массы –5+0, –10+5, –15+10 мм, а в пробе № 2 – только класс –5+0 мм, так как остальные классы крупности имеют содержание менее 0,7 г/т. Исходя из данных эксплуатационной разведки в контурах рассматриваемого выемочного блока определено, что среднее содержание металла в некондиционной руде составляет 0,48 г/т.

С учетом полученных результатов исследований проб № 1 и 2 для условной руды с содержанием 0,48 г/т можно пропорционально принять параметры распределения металла по классам крупности: –5+0 мм – 1,08 г/т, –10+5 мм – 0,78 г/т, –15+10 мм – 0,64 г/т. В данном случае продуктивными будут являться классы крупности –5+0 и –10+5 мм.

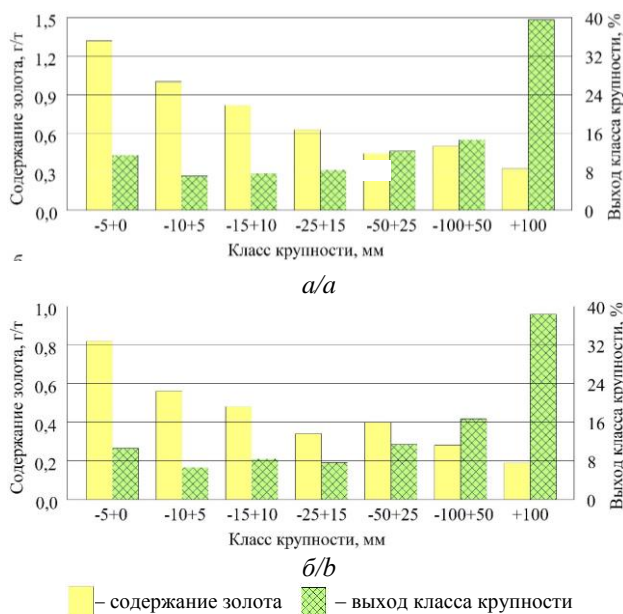


Рис. 1. Распределение металла по классам крупности некондиционной рудной массы: а) проба № 1 (среднее содержание золота 0,59 г/т); б) проба № 2 (среднее содержание золота 0,36 г/т)

Fig. 1. Metal distribution by size classes of substandard ore mass: а) sample no. 1 (average gold content 0.59 g/t); б) sample no. 2 (average gold content 0.36 g/t)

Однако необходимо отметить, что в случае выделения из всего объема некондиционных руд класса –10+0 мм в качестве продуктивной фракции при работе с рудной массой со средним содержанием около 0,6 г/т в продуктивную фракцию не будет вовлекаться класс крупности –15+10 мм с содержанием золота более 0,8 г/т, в то же время в рудной

массе со средним содержанием около 0,4 г/т в продуктивную фракцию будет включен класс –10+5 мм с относительно низким содержанием металла (менее 0,6 г/т). Это с одной стороны приведет к потере части минерального сырья с кондиционным содержанием полезного компонента, а с другой стороны снизит качество выделенной продуктивной фракции. Таким образом, для устранения вышеперечисленных недостатков необходимо применение усовершенствованной технологии с гибким управлением качеством вовлекаемого в переработку некондиционного минерального сырья.

Результаты исследования

Несмотря на достаточно широкую практику вовлечения в переработку некондиционных золотосодержащих руд на многих предприятиях в различных регионах мира, у каждого месторождения имеются свои горнотехнические условия, а также характеристики и особенности руд, которые требуют частного технико-экономического обоснования [19].

Выделение продуктивной фракции целесообразно вести при перевалке некондиционной рудной массы на грохотильно-дробильном перегрузочном пункте карьера при осуществлении процесса ее перемещения автомобильно-конвейерным транспортом. Автором предлагается схема добычи и переработки минеральной массы с гибким управлением ее качеством, обеспечивающая выделение из некондиционной руды с различным содержанием полезного компонента продуктивных фракций (рис. 2).

Селективная выемка разносортной минеральной массы ведется с применением одноковшовых погрузчиков или экскаваторов. Автосамосвалы с некондиционной рудой, бедной и богатой кондиционной рудой направляются на крупнопорционную сортировку, оборудование рудоконтрольной станции настроено на четыре порога сортировки: 0,3, 0,5, 0,7 и 2,0 г/т. В процессе крупнопорционной сортировки выделяются автосамосвалы, загруженные минерализованными вмещающими породами с содержанием менее 0,3 г/т, кондиционной бедной рудой ($C=0,7-2,0$ г/т), кондиционной богатой рудой ($C>2$ г/т), а также некондиционной рудной массой с содержанием 0,3–0,5 и 0,5–0,7 г/т. Автосамосвалы получают адрес разгрузки и везут минеральную массу на соответствующие внутрикарьерные промежуточные склады, находящиеся в непосредственной близости от грохотильно-дробильного перегрузочного пункта карьера, на котором осуществляется крупное грохочение горной массы с выделением на колосниках транспортабельных для ленточного конвейера кусков (–300 мм) в виде подрешетного продукта и крупнокускового материала (+300 мм), направляемого на дробление, после чего подготовленная к транспортировке горная масса поступает на ленточный конвейер.

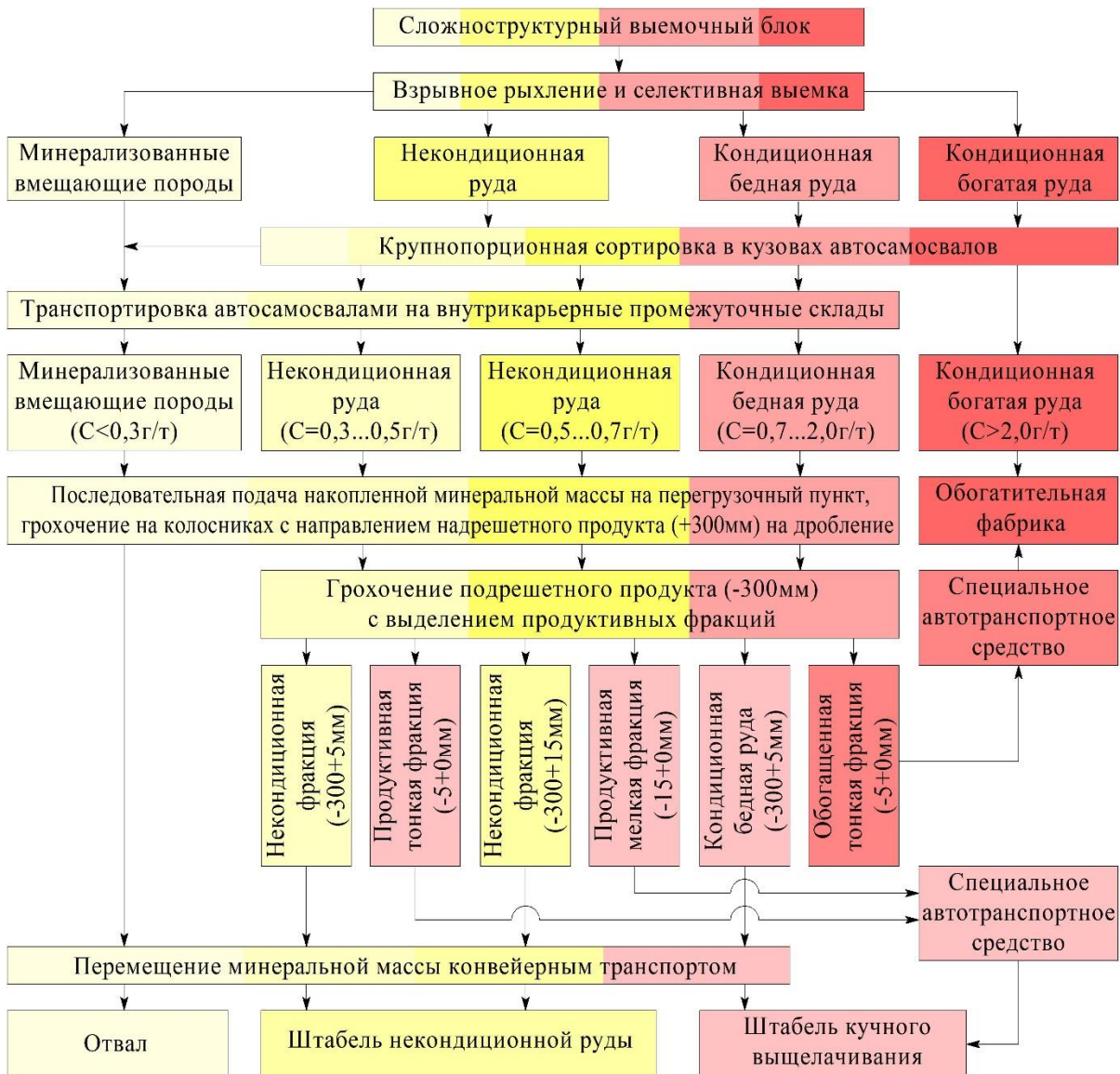


Рис. 2. Схема добычи и переработки с гибким управлением качеством минеральной массы
 Fig. 2. Scheme of extraction and processing with flexible management of mineral mass quality

Для выделения из некондиционной рудной массы продуктивных фракций под колосниками предлагается разместить механический грохот с просеивающими поверхностями для среднего, мелкого и тонкого грохочения, а также накопительный бункер для сбора продуктивных фракций. Оставшиеся в качестве надрешетного продукта некондиционные фракции поступают по рудоспуску в разгрузочный бункер дробилки и далее – на конвейер. Предлагается также при перегрузке кондиционной бедной руды выделять на механическом грохоте обогащенную тонкую фракцию, среднее содержание металла в которой ориентировочно будет составлять 2,5–3,0 г/т (согласно данным эксперимента класс крупности $-5+0$ мм) в 2,2–2,3 раза обогащен металлом), и направлять ее на переработку на обогатительную фабрику вместе с кондиционной богатой рудой для

обеспечения более высокого извлечения металла. Продуктивные мелкая и тонкая фракции специальными транспортными средствами доставляются к месту проведения кучного выщелачивания, где после окомкования рудной мелочи $(-3+0)$ мм из них совместно с дробленной до крупности -15 мм кондиционной бедной рудой формируется штабель.

Ценность металла, извлекаемого при переработке полученных продуктивных мелкой и тонкой фракций, должна превышать затраты, связанные с выделением, транспортировкой и переработкой данного минерального сырья:

$$\text{Ц}k_b(Q_m c_m E_m + Q_t c_t E_t) > 3 \cdot P,$$

где Ц – цена полезного компонента; k_b – коэффициент извлечения полезного компонента из продук-

тивных фракций; Q_m, Q_t – доля, соответственно, мелкой и тонкой продуктивных фракции в объемах некондиционной руды с разным содержанием металла; c_m, c_t – средневзвешенное содержание полезного компонента в выделяемых соответственно мелкой и тонкой продуктивных фракциях; E_m, E_t – эффективность грохочения при выделении, соответственно, мелкой и тонкой продуктивных фракций; Z – затраты, связанные с выделением, транспортировкой и переработкой продуктивных фракций; P – уровень рентабельности производства.

Определение рациональных объемов мелкой и тонкой продуктивных фракций проводится с использованием результатов исследования по определению содержания металла в классах крупности взорванной некондиционной рудной массы, доставляемой на перегрузочный пункт, с включением в продуктивные фракции классов крупности с содержанием полезного компонента больше нижнего граничного значения, принятого для бедной руды. Доли продуктивных фракций в объеме некондиционной руды могут быть определены по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i,$$

где q_i – доля i -го класса крупности в объеме взорванной рудной массы; n – количество классов крупности с кондиционным содержанием полезного компонента.

Средневзвешенное содержание полезного компонента в продуктивных фракциях может быть определено по зависимости:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i},$$

где c_i – содержание полезного компонента в i -м классе крупности.

Проведены сравнительные расчеты показателей извлечения металла по предлагаемой и известной технологиям добычи и переработки для одного из сложноструктурных выемочных блоков рассматриваемого золоторудного месторождения. Обе технологии предполагают селективную выемку кондиционной богатой (КБР) и кондиционной бедной (КБР) руды, некондиционных руд (НР) и минерализованных вмещающих пород (МВП) с осуществлением последующей крупнопорционной сортировки рудной массы, транспортировку минерального сырья на внутрикарьерные промежуточные склады, последовательную подачу разнорудной минеральной массы на грохотильно-дробильный перегрузочный пункт с последующей транспортировкой конвейером. Отличие предлагаемой технологии от

известной состоит в разделении некондиционной руды по содержанию полезного компонента 0,3–0,5 и 0,5–0,7 г/т с выделением на дополнительно установленном грохоте продуктивных мелкой и тонкой фракций, объединяемых в дальнейшем в общую продуктивную фракцию (ПФ) с направлением на кучное выщелачивание, а некондиционной фракции (НФ) – на склад некондиционной руды. Также производится разделение на грохоте кондиционной бедной руды на обогащенную полезным компонентом тонкую фракцию (ТФ) и крупную фракцию кондиционной бедной руды (КФ) с их отдельной переработкой. Результаты расчетов представлены в таблице.

Таблица. Параметры извлечения золота из минеральной массы

Table. Metal extraction rates from mineral raw materials

Минеральная масса Mineral mass	Доля минеральной массы, % Share of mineral mass, %	Содержание золота, г/т Gold content, g/t	Доля золота в минеральной массе, % Gold proportion in mineral mass, %	Извлечение золота в конечный продукт, % Gold extraction into the final product, %	Доля извлеченного золота, % Share of extracted gold, %
Известная технология с отдельной переработкой минерального сырья Well-known technology with separate processing of mineral raw materials					
КБР/СРО	21,4	2,73	53,2	80	42,5
КБР/СРО	24,6	1,24	27,8	65	18,0
НР/СО	43,6	0,48	19,0	-	-
МВП/МНР	10,4	-	-	-	-
Итого/Total	100,0	1,10	100,0	-	60,5
Предлагаемая технология с отдельной переработкой минерального сырья Proposed technology with separate processing of mineral raw materials					
КБР/СРО	21,4	2,73	53,2	80	42,5
ТФ/ФФ	2,2	2,79	5,6	80	4,7
КФ/МФ	22,4	1,09	22,2	63	14,0
ПФ/ПФ	7,9	1,01	7,3	63	4,6
НФ/СФ	35,7	0,36	11,7	-	-
МВП/МНР	10,4	-	-	-	-
Итого/Total	100,0	1,10	100,0	-	65,8

CRO – conditioned rich ore, *CPO* – conditioned poor ore, *SO* – substandard ore, *MHR* – mineralized host rocks, *FF* – fine fraction, *MF* – major fraction, *PF* – productive fraction, *SF* – substandard fraction.

Таким образом, предлагаемая технология позволит увеличить извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока на 5,3 % преимущественно за счет вовлечения в переработку продуктивных фракций некондиционной рудной массы.

Заключение

На основании полученных научных и практических результатов по вопросам повышения эффективности ведения открытых горных работ путем вовлечения в переработку некондиционного минерального сырья автором сделаны следующие выводы.

1. При ведении открытых горных работ образуется большое количество техногенных отходов, направляемых в отвалы вскрышных и минерализованных пород, а также штабели некондиционной руды, в которых может содержаться существенная доля металла, извлекаемого из недр. Так, в рассматриваемом сложноструктурном выемочном блоке исследуемого золоторудного месторождения в некондиционной руде содержится 19 % металла.
2. На основании анализа научно-технической литературы и собственных исследований отмечено, что на многих месторождениях цветных и благородных металлов для взорванной рудной массы характерно наличие повышенного содержания полезного компонента в мелкой и особенно в тонкой фракциях, в частности, проведенные с участием автора исследования золото-содержащей руды показали, что содержание металла в рудной мелочи (–15+10, –10+5 и –5+0 мм) в 1,38–2,30 раза превышает среднее содержание золота в пробах.
3. Выделение из всего объема некондиционной руды с содержанием 0,3–0,7 г/т продуктивной фракции одной крупности (–10+0 мм) приведет к тому, что при работе с рудной массой со средним содержанием около 0,6 г/т в продуктивную фракцию не будет вовлекаться класс крупности –15+10 мм с содержанием золота более 0,8 г/т, в то же время в рудной массе со средним содержанием порядка 0,4 г/т в продуктивную фракцию будет включен класс –10+5 мм с относительно низким содержанием металла (менее 0,6 г/т).
4. Предлагаемая технологическая схема с гибким управлением качеством выделяемых продуктивных фракций позволит увеличить содержание полезного компонента в дополнительно получаемом минеральном сырье, что в дальнейшем повысит извлечение металла при кучном выщелачивании и снизит себестоимость его получения.
5. Оснащение горехотильно-дробильного перегрузочного пункта дополнительным оборудованием, позволяющим выделять из рудной массы обогащенные полезным компонентом продуктивные фракции, даст возможность применительно к рассматриваемому выемочному блоку дополнительно вовлечь в переработку рудную массу, содержащую 7,3 % добываемого из недр металла, что позволит в 1,62 раза снизить потери золота со складываемыми некондиционными рудами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов Г.И. Золотодобывающая промышленность Дальневосточного федерального округа: состояние и проблемы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2024. – № 1. – С. 41–52.
2. Инновационные технологии переработки упорных и бедных руд золота как основа рационального недропользования / Б.К. Михайлов, Г.В. Седелникова, Б.И. Беневольский, А.И. Романчук // Руды и металлы. – 2014. – № 1. – С. 5–8.
3. Голик В.И. Поэтапная комбинированная разработка золоторудных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 368–378. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-368-378
4. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – Vol. 37 (5). – P. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.
5. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. – Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. – 804 p.
6. 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
7. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, С.Д. Викторов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12. – С. 5–12.
8. Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд / Н.Г. Валиев, Ю.И. Разоренов, В.И. Голик, М.С. Лебзин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 33–43. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33
9. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conicalcrite and chalcopryrite under different leaching systems // Korean Journal of Metals and Materials. – 2019. – Vol. 57 (4). – P. 245–250. DOI: 10.3365/KJMM.2019.57.4.245.
10. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3291
11. A transitional perspective of global and regional mineral material flows / Y. Baninla, M. Zhang, Y. Lu, R. Liang, Q. Zhang, Yu. Zhou, K. Khan // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – Vol. 140. – P. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
12. Струков К.И., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития «Южуралзолото Группа компаний» в условиях проявления глобальных вызовов // Горная промышленность. – 2021. – № 1. – С. 54–60. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-54-60.
13. John, L.W. The art of heap of heap leaching-the fundamentals // Proceedings of Percolation Leaching: The Status Globally and in South Africa. – Africa: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011. – P. 17–20.

14. Plankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: challenges and opportunities // *Minerals Engineering*. – 2018. – Vol. 125. – P. 206–222. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.006.
15. Nieto A., Muncher B. An applied economic assessment and value maximization of a mining operation based on an iterative cut-off grade optimization algorithm // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2021. – Vol. 12 (4). – P. 309–326. DOI: 10.1504/IJMMME.2021.121330.
16. Marsden J.O. Overview of gold processing techniques around the world // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2006. – Vol. 23 (3). – P. 121–125. DOI: 10.1007/BF03403198.
17. Наимова Р.Ш. Перспективы использования вскрышных пород карьера Мурунтау в качестве резервного сырьевого источника // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2011. – № 3. – С. 117–122.
18. Optimisation of the leaching parameters of a gold ore in sodium cyanide solution / N. Hlabangana, S. Bhebhe, N.G. Mguni et al. // *International Journal of Engineering Research and Reviews*. – 2018. – Vol. 6 (1). – P. 1–10.
19. Shirima J., Wikedzi A., Rasskazova A.V. Investigation of old waste dump composition of lean gold-bearing ores from the Golden Pride Project (GPP) mining operation in Nzega district, Tanzania // *Mining Science and Technology (Russia)*. – 2024. – Vol. 9 (1). – P. 5–11. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-07-130.
20. Лагов В.С., Лагов П.В. Радиометрическая сортировка и сепарация твердых полезных ископаемых. – М.: Изд-во МИСИС, 2007. – 155 с.
21. Совершенствование технологии переработки вольфрамовых руд Холтосонского и Инкурского месторождений / А.В. Темнов, Л.П. Тигунов, В.К. Рябкин, Ю.А. Воеводин, В.Ф. Банников, И.Г. Луговская // *Разведка и охрана недр*. – 2013. – № 2. – С. 61–67.
22. Способ предварительного обогащения горнорудной массы при открытой разработке месторождений коренного золота: пат. № 2477181, Российская Федерация С1; заявл. 18.10.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7. – 12 с.
23. Скорик Л.Ф., Павлов Н.А., Сацук А.С. О повышении эффективности системы управления качеством золотосодержащих руд // *Путь науки*. – 2017. – № 1. – С. 36–39.
24. Совершенствование схем добычи и переработки руд при освоении сложноструктурных месторождений / И.Ю. Рассказов, А.Ю. Чебан, Н.М. Литвинова, Т.Г. Конарева, А.С. Андрущенко // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2023. – № 2. – С. 57–67. DOI: 10.15372/FTPRI20230206.
25. Чебан А.Ю. Технология складирования некондиционных руд с выделением продуктивных мелких фракций // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2024. – № 1. – С. 388–398.
26. Корнилов С.В., Титов Р.С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов для выделения продуктивных фракций минерального сырья // *Проблемы недропользования*. – 2023. – № 3 (38). – С. 36–46. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.036.
27. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию / А.Г. Шадронов, С.А. Саблев, И.А. Пыталев, О.В. Фридрихсон // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2020. – № 4. – С. 535–547.
28. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – a case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines // *IronOre 2009 Conference*. – Perth, WA, July 27–29, 2009. – P. 269–276.
29. 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 (2). – P. 18–23.
30. Мальгин О.Н., Кустов А.М., Коломников С.С. Развитие циклично-поточной технологии в транспортной системе карьера «Мурунтау» // *Горный журнал*. – 2007. – № 5. – С. 33–37.

Информация об авторе

Антон Юрьевич Чебан, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотехнологии и горной теплофизики, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51; echebanay@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>

Поступила в редакцию: 06.09.2024

Поступила после рецензирования: 24.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Arkhipov G.I. The gold mining industry of the Far Eastern federal district: the state and problems. *Mineral Resources of Russia. Economics And Management*, 2024, no. 1, pp. 41–52. (In Russ.)
2. Mikhailov B.K., Sedelnikova G.V., Benevolsky B.I., Romanchuk A.I. Innovative technologies for processing refractory and lean gold ores as a basis for rational subsoil use. *Ores and metals*, 2014, no. 1, pp. 5–8. (In Russ.)
3. Golik V.I. Phased combined development of gold ore deposits. *Sustainable development of mountain territories*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 368–378. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-368-378.
4. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2020, vol. 37, no. 5, pp. 1385–1399. DOI 10.1007/s42461-020-00262-1/
5. Jarvie-Eggart M.E. *Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world*. Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
6. Oleynik D.N., Rylnikova M.V., Shvabenland E.E. Improving the legal framework for the mining wastemanagement in Russia. *Rational development of subsoil*, 2024, no. 6, pp. 24–35. (In Russ.) DOI: 10.26121/RON.2023.74.6.001.

7. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2014, no. 12, pp. 5–12. (In Russ.)
8. Valiev N.G., Razorenov Yu.I., Golik V.I., Lebzin M.S. Combination of leaching technologies with conventional ore processing techniques. *Mining information and analytical bulletin*, 2024, no. 4, pp. 33–43. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_33.
9. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conicalcrite and chalcopryrite under different leaching systems. *Korean Journal of Metals and Materials*, 2019, vol. 57, no. 4, pp. 245–250. DOI: 10.3365/KJMM.2019.57.4.245.
10. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ore of the gold-pyrite deposit Abyz (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3291.
11. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 140, pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.014.
12. Strukov K.I., Rylnikova M.V. Issues and prospects for the development of Uzhuralzoloto group of companies in conditions of global challenges. *Mining Industry Journal*, 2021, no. 1, pp. 54–60. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-54-60.
13. John L.W. The art of heap of heap leaching—the fundamentals. *Proc. of Percolation Leaching: The Status Globally and in South Africa*. Africa, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011. pp. 17–20.
14. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 125, pp. 206–222. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.006
15. Nieto A., Muncher B. An applied economic assessment and value maximization of a mining operation based on an iterative cut-off grade optimization algorithm. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2021, vol. 12 (4), pp. 309–326. DOI: 10.1504/IJMM. 2021.121330
16. Marsden J.O. Overview of gold processing techniques around the world. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2006, vol. 23 (3), pp. 121–125. DOI: 10.1007/BF03403198.
17. Naimova R.Sh. Prospects for the use of overburden rocks of the Muruntau quarry as a reserve source of raw materials. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2011, no. 3, pp. 117–122. (In Russ.)
18. Hlabangana N., Bhebhe S., Mguni N.G. Optimisation of the leaching parameters of a gold ore in sodium cyanide solution. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 2018, vol. 6 (1), pp. 1–10.
19. Shirima J., Wikedzi A., Rasskazova A.V. Investigation of old waste dump composition of lean gold-bearing ores from the Golden Pride Project (GPP) mining operation in Nzega district, Tanzania. *Mining Science and Technology (Russia)*, 2024, vol. 9 (1), pp. 5–11. DOI: 10.17073/ 2500-0632-2023-07-130
20. Lagov V.S., Lagov P.V. *Radiometric sorting and separation of solid minerals*. Moscow, MISIS Publ. House, 2007. 155 p. (In Russ.)
21. Temnov A.V., Tigonov L.P., Ryabkin V.K., Voevodin Yu.A., Bannikov V.F., Lugovskaya I.G. Improvement of the technology of processing of tungsten ores the Holtoson and Inkur deposits. *Exploration and Protection of Subsoil*, 2013, no. 2, pp. 61–67. (In Russ.)
22. Lobanov N.F., Kamnev E.N., Kasatkin V.V., Latyshev V.E., Sytenkov V.N., Eremin A.M., Potapov V.A., Filippov S.A. *Method for preliminary enrichment of ore mass in open-pit mining of primary gold deposits*. Patent RF, no. 2477181, 2013. (In Russ.)
23. Skorik L.F., Pavlov N.A., Satsuk A.S. On raising efficiency of quality control system for gold ores. *The Way of Science*, 2017, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.)
24. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvinova N.M., Konareva T.G., Andryushchenko A.S. Improvement of mining and processing flowsheets at structurally complex ore deposits. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, 2023, no. 2, pp. 57–67. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20230206.
25. Cheban A.Yu. Technology for storage of sub-specific ores with separation of productive fine fractions. *Bulletin of the Tula State University. Sciences and the Earth*, 2024, no. 1, pp. 388–398. (In Russ.)
26. Kornilkov S.V., Titov R.S. Parameter optimization for quarry routing and reloading points for the allocation of productive fractions of mineral raw materials. *Problems of subsoil use*, 2023, no. 3, pp. 36–46. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2023.03.036.
27. Shadrinov A.G., Sablev S.A., Pytalev I.A., Fridrikhson O.V. Improvement of the Svetlinsky gold deposit logistics scheme with transition to cycle-flow technology. *Bulletin of the Tula State University. Sciences and the Earth*, 2020, no. 4, pp. 535–547. (In Russ.)
28. Lucio J.C., Senra C.T., Souza A. Paving the future – a case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines. *IronOre 2009 Conference*. Perth, WA. July 27–29, 2009. pp. 269–276.
29. 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 (2), pp. 18–23.
30. Malgin O.N., Kustov A.M., Kolomnikov S.S. Development of the cyclic and continuous flow technology in transportation system of Muruntau quarry. *Mining magazine*, 2007, no. 5, pp. 33–37. (In Russ.)

Information about the author

Anton Yu. Cheban, Cand. Sc., Leading Researcher, Institute of Mining of Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 51, Turgenev street, Khabarovsk, 680000, Russian Federation; chebanay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2707-626X>

Received: 06.09.2024

Revised: 24.09.2024

Accepted: 21.04.2025