

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## MINING AND MINERAL PROCESSING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12

### ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ К СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКЕ РУД СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Чебан А.Ю., Секисов Г.В.

Институт горного дела ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

**Аннотация. Актуальность и цель исследования.** В связи с истощением минерально-сырьевой базы в отработку вовлекаются месторождения или их отдельные участки со все более сложными горнотехническими условиями. Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья должна вестись с учетом принципов ресурсосбережения с обеспечением селекции и последующего усерднения технологических типов руд для снижения неравномерности состава рудной массы, поступающей на обогащение. Качество добываемой рудной массы оказывает влияние на эффективность всех последующих процессов горно-обогатительного производства, поэтому технологию выемки и ее параметры необходимо увязывать со структурой оруднения выемочного блока и ценностю руд с учетом требований технологии обогащения. **Цель работы.** Создание технологии разработки сложноструктурных месторождений, обеспечивающей селективную подготовку к выемке и собственно выемку различных сортов руд с одновременным обеспечением качественного усерднения бедной и рядовой рудной массы, для подготовки оптимальных для последующей переработки параметров рудной массы и обеспечения максимального выхода металла в процессе обогащения. **Результаты.** В статье предлагается технология комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений с применением гибкого сочетания механических, взрывных и специальных методов дезинтеграции горных пород. Технология заключается в выделении и оконтуривании зон руд разных сортов на основе данных сопровождающей эксплуатационной разведки и предварительном механическом извлечении наиболее богатых – штуфных руд с применением выбуривания. Затем зоны богатых руд обуваются шпурами или скважинами малого диаметра с целью последующего взрываания и получения мелкокусковой рудной массы, а оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами, дезинтегрируется взрывной подготовкой с обычными параметрами взрывных скважин и их сеткой. Для последующей селективной выемки руд различных сортов предлагается использовать одноковшовые погрузчики и колесные скреперы с усовершенствованым рабочим оборудованием. **Практическая значимость.** Комбинация механической выемки и дифференцированной взрывной подготовки руд позволяет в последующем оказывать существенное влияние на показатели извлечения при добыче и переработке. Предлагаемая технология добычных работ и усовершенствованная схема последующей разделительной переработки штуфных и усердненных руд, а также промпродуктов от предыдущих процессов обогащения позволяет получить высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока.

**Ключевые слова:** сложноструктурные месторождения, выемочный блок, сорт руды, селективное рыхление, одноковшовый погрузчик, колесный скрепер, обогащение рудной массы.

© Чебан А.Ю., Секисов Г.В., 2020

#### Для цитирования

Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 4–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## RATIONALE FOR THE USE OF A COMBINED PREPARATION FOR SELECTIVE EXTRACTION OF ORES FROM COMPLEX STRUCTURE DEPOSITS

Cheban A.Yu., Sekisov G.V.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Abstract. Relevance and Objective of the Study.** Due to depleting mineral resources, industrial companies are involved in mining deposits or their individual sections with increasingly complex mining and technical conditions. Complex structure deposits of valuable mineral raw materials should be mined taking into account the resource-saving principles and ensuring the selection and downstream blending of technological types of ores to reduce a non-uniform composition of the ore mass entering the beneficiation stage. The quality of the mined ore mass influences the efficiency of all the downstream processes; therefore, the mining technology and its parameters are to be linked to the mineralization structure of the mining block and the ore value, complying with the requirements for the beneficiation technology. **Objective.** To develop a technology for the mining of complex structure deposits ensuring a selective preparation for the excavation and the actual excavation of various ore grades, while ensuring a high-quality blending of the low-grade and run-of-mine ore masses to prepare ore mass parameters optimal for subsequent processing and to ensure maximum metal yield in the beneficiation process. **Results.** The paper proposes the technology of the combined preparation for the selective extraction of ores from complex structure deposits, using a flexible combination of mechanical, explosive and special methods of rock disintegration. The technology consists in the allocation and outlining of zones of ores of different grades based on the data of the accompanying operational exploration and preliminary mechanical extraction of the highest-grade (lump) ores using drilling. Then the high-grade ore zones are drilled with boreholes or small-diameter wells for subsequent blasting and producing small-size ore mass, and the remaining part of the extraction block, composed of ordinary and low-grade ores, as well as barren rock, is disintegrated by explosive preparation with the conventional parameters of blast holes and their grid. To carry out the subsequent selective extraction of ores of various grades, it is proposed to use single-bucket loaders and wheel scrapers with advanced working equipment. **Practical Relevance.** The combination of the mechanical excavation and differentiated explosive preparation of ores contributes to a subsequent significant impact on the extraction performance during mining and processing. The proposed mining technology and an improved scheme for the subsequent separate processing of lump and blended ores, as well as industrial products from previous beneficiation processes, contribute to a high total metal extraction from ores of a complex structure mining block.

**Keywords:** complex structure deposits, mining block, ore grade, selective ripping, single-bucket loader, wheel scraper, ore mass beneficiation.

### For citation

Cheban A.Yu., Sekisov G.V. Rationale for the Use of a Combined Preparation for Selective Extraction of Ores from Complex Structure Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 4-12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12>

### Введение

В связи с истощением минерально-сырьевой базы недропользователи вынуждены переходить к отработке месторождений или их отдельных участков со все более сложными горнотехническими условиями. При этом сложноструктурные выемочные блоки во многих случаях характеризуются как чередованием пустых пород и руд, так и руд различных типов и сортов с различным градиентом содержаний полезных компонентов при переходе от зон с богатыми или даже штуфными рудами к бедным или некондиционным. Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья

должна вестись с применением технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения, что может быть достигнуто путем применения нетрадиционных технологических решений [1]. В связи с развитием техники и технологий для открытой и подземной добычи руд в отработку вовлекаются месторождения или их отдельные участки, освоение которых ранее считалось нерентабельным [2-8]. Во многих случаях в разрабатываемом массиве отсутствуют визуально наблюдаемые границы между рудами различных типов и сортов, а также пустыми породами. Разработка сложноструктурных выемочных блоков без достаточно глубокой селекции и качественного

последующего усреднения «внутри» технологических типов руд приводит к неравномерности состава рудной массы, поступающей на обогащение. Поскольку процессы обогащения имеют поточный характер, их адаптация к резким колебаниям качества питания весьма ограничена, неоднородность состава рудной массы, понижение содержания в ней полезных компонентов отрицательно влияют на показатели обогащения, приводят к снижению извлечения и качества концентратов, увеличению расхода реагентов, количества хвостов и объема хвостохранилищ, снижению производительности обогатительного оборудования [9]. Таким образом, качество добываемой рудной массы оказывает влияние на эффективность всех последующих процессов горно-обогатительного производства, поэтому технологию выемки и ее параметры необходимо увязывать со структурой оруденения выемочно-го блока и ценностью руд с учетом требований технологии обогащения.

### **Состояние вопроса и постановка проблемы**

С позиций выемки сложноструктурное оруденение можно разделить на два типа: с выдержаными параметрами залегания (простирания, падения, мощности); с невыдержаными параметрами (с раздувами и пережимами, с изменением простирания и падения, но с выдержаным распределением полезного компонента). При этом оруденение с выдержаными параметрами залегания может иметь существенное неравномерное распределение полезного компонента с наличием зон сплошной рудной минерализации. Обеспечить требуемое качество минерального сырья сложноструктурных месторождений позволяют добычные технологии, основанные на селективной выемке рудной массы. Технологическая схема добычи является одной из основных категорий горных работ, по определению академика В.В. Ржевского, «технологическими процессами называются варианты системы разработки, различающиеся видами применяемого горного и транспортного оборудования в комплектах, наличием дополнительных связей между машинами комплекта, взаимным расположением вскрышных и добывочных комплектов оборудования» [10]. Совершенствование традиционных и разработка принципиально новых технологических средств выемки полезных ископаемых обуславливает создание новых технологических схем добывочных работ. Базовыми принципами создания новых способов селективной выемки руд являются: сведение к минимуму перемешивания разнокачественной горной массы в про-

цессе выемки за счет неконтролируемого обрушения забоя; максимально полное сопряжение границ элементов выемки с контуром рудного тела в разрыхленном взрывом массиве; глубокая дифференциация разрабатываемого взорванного рудно-породного массива [11].

Подготовка рудных массивов к выемке преимущественно осуществляется посредством взрывного рыхления, в результате которого происходит существенная трансформация массива с частичным перемешиванием разнокачественных участков, изменением структурно-морфологических и параметрических свойств. При разработке сложноструктурных массивов, сложенных породами сравнительно невысокой прочности, возможна безвзрывная выемка горной массы с применением горных комбайнов различных конструкций, одноковшовых экскаваторов со специальным оборудованием в виде ковшей активного действия, гидромолотов и гидрорипперов, бульдозерно-рыхлительных и буровых агрегатов, а также другого горного оборудования [7, 12].

Известны технологии комбинированной разработки тонких рудных тел сложной структуры, заключающиеся в выбуривании самых богатых (штуфных) руд, это позволяет значительно сократить их разубоживание, одновременно создать компенсационные полости для последующей взрывной отбойки оставшейся рядовой руды [13–14]. При выбуривании первоначально буровым агрегатом проходят пилотные скважины с последующим их обратным разбуриванием с применением расширителя [13]. Селективная выемка штуфной руды позволяет, перерабатывая ее по отдельной схеме, добиваться более высокого извлечения металла из рудной массы. В способе [14] предлагается выбуривание непосредственно в рудной жиле скважин, а затем их расширение с использованием термического дробления до границы с вмещающими породами, после чего в целиках между расширенными скважинами бурят шпуры и осуществляют взрывное рыхление целиков. Компанией Atlas Copco предложен способ расширения вниз (Down Reaming), заключающийся в бурении пилотной скважины в направлении сверху вниз и ее последующем расширении также сверху вниз, оборудование для реализации данного способа позволяет формировать выработки диаметром 1,5 м протяженностью до 30 м [15]. Недостатком способов [13–15] является то, что селективно вынимаются только наиболее богатые зоны рудного тела, а остальная часть рудного тела, включающая бедные и рядовые руды, а также частично руды с содержанием полезного компонента

выше рядовых значений, валово взрывается и вынимается, при этом руды разных сортов перемешиваются, не достигая должного усреднения.

Изменение содержания полезного компонента в рудной массе влияет на эффективность процесса обогащения. Так, повышение содержания полезного компонента по отношению к оптимальному значению приводит к незначительному росту извлечения, в то же время снижение содержаний ведет к относительно резкому падению извлечения, т.е. прирост извлечения в первом случае не компенсирует потери в последующем [16].

Целью работы является создание технологии разработки сложноструктурных месторождений, обеспечивающей селективную подготовку к выемке и собственно выемку различных сортов руд с одновременным обеспечением качественного усреднения бедной и рядовой рудной массы для подготовки оптимальных для последующей переработки параметров рудной массы и обеспечения максимального выхода металла в процессе обогащения.

### Результаты исследований и их обсуждение

Авторами предлагается технология селективной разработки сложноструктурных рудных месторождений. Наибольшим масштабом оруднения и значительной вариацией минеральных парагенезисов и концентрации полезных компонентов обладают штокверки. В связи с чем вопросы селективной выемки и управления качеством при разработке подобных месторождений в целом являются весьма актуальными. Основная идея заключается в обеспечении повышения эффективности разработки путем повышения глубины разделения руд по качественным признакам при селективной выемке за счет гибкого сочетания механических, взрывных и специальных методов. Для обеспечения возможности селективной выемки необходимо осуществлять взрывную подготовку массива при рыхлении руд различных сортов. Предлагаемая авторами дифференцированная подготовка может быть использована для разработки сложноструктурных месторождений, содержащих высокоценное минеральное сырье.

В качестве примера объекта, где целесообразно использование концепции глубокой селекции, может быть предложено Дарасунское рудное поле (Забайкальский край), которое включает несколько месторождений (Дарасунское, Теремки, Талатут) с существенно различными характеристиками оруднения и составом рудной минерализации. Основными морфолого-

структурными типами Дарасунского месторождения, составляющего основу Дарасунского рудного поля, являются многочисленные жильные и брекчевые тела, в которых наблюдается значительная вариативность концентраций золота, меди, а также состава содержащих их минералов. Поэтому, учитывая высокие содержания золота, целесообразно осуществлять глубокую селекцию руд при выемке. Месторождения Дарасунского рудного поля частично отработаны, оставшиеся запасы, находящиеся в жилах, необходимо отрабатывать подземным способом, а запасы, сконцентрированные в брекчевых телах, расположенных на небольшой глубине, могут быть отработаны открытым способом.

Перед разработкой сложноструктурного месторождения необходимо произвести оценку неоднородности путем многоуровневого ранжирования разрабатываемого массива по геолого-технологическим и физико-техническим параметрам. При этом методы оконтуривания включают на первой стадии выделение крупных выемочных единиц, сопоставимых по объему месячной (недельной) добыче, на второй – последующее выделение непосредственных элементов выемки. Брекчевые рудные тела Дарасунского месторождения имеют сложную структуру. При оконтуривании их на стадии эксплуатационной разведки могут быть выделены штуфные, богатые, рядовые, бедные руды и пустые породы (рис. 1).

В отдельных выемочных блоках брекчевого рудного массива Дарасунского месторождения штуфные руды составляют 1–2% объема запасов блока, богатые руды – до 10%, рядовые – до 45–50%. Содержание золота в штуфных рудах может превышать  $\text{px}100 \text{ г/т}$ , в богатых рудах – более 10 г/т, в рядовых – более 2 г/т, в бедных – 0,5–2 г/т. Выделение в выемочных блоках контуров рудных зон различных кондиций осуществляется по данным сопровождающей разведки в процессе бурения взрывных скважин. На основе анализа шлама от перебора взрывных скважин появляются также предварительные данные по структуре оруднения низкележащего горизонта, которые можно использовать для планирования дальнейшего развития горных работ.

При подготовке к выемке блока 9 первоначально буровым агрегатом ведется опережающая механическая выемка по обогащенным зонам выемочного блока 9 путем выбуривания штуфных руд с образованием компенсационных полостей (рис. 2). Перед механической выемкой штуфных руд может быть осуществлено их предварительное разупрочнение с применением

специальных методов и средств, в частности поверхности активных веществ. Затем буровым агрегатом осуществляется обуривание шпурами или скважинами малого диаметра зон богатых руд с целью последующего взрывания и получе-

ния мелкокусковой рудной массы. Увеличение степени дробления повышает стоимость и энергоемкость процесса рыхления, однако в дальнейшем уменьшает затраты при выемке и последующей переработке рудной массы.

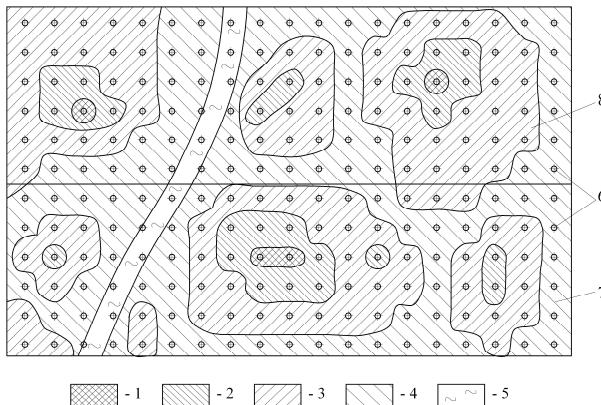


Рис. 1. Структурная схема брекчевого оруднения выемочного блока: 1 – штучная руда; 2 – богатая руда; 3 – рядовая руда; 4 – бедная руда; 5 – пустая порода; 6 – взрывные скважины; 7, 8 – выемочные блоки

Fig. 1. Structural diagram of the breccia mineralization of the mining block: 1 is lump ore; 2 is high-grade ore; 3 is run-of-mine ore; 4 is low-grade ore; 5 is barren rock; 6 is blast holes; 7, 8 are mining blocks

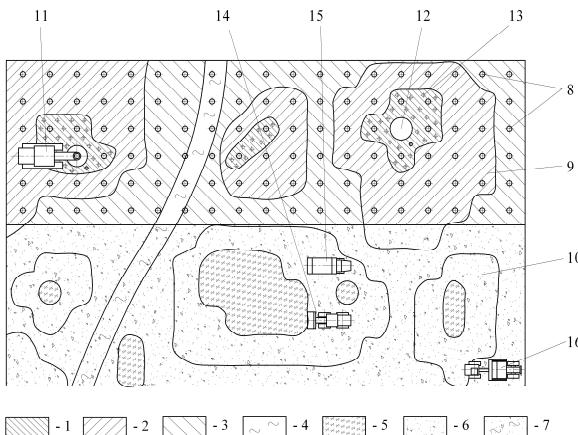


Рис. 2. Схема отработки смежных выемочных блоков: 1 – богатая руда; 2 – рядовая руда; 3 – бедная руда; 4 – пустая порода; 5 – богатая рудная масса; 6 – рядовая и бедная рудная масса; 7 – безрудная горная масса; 8 – взрывные скважины; 9, 10 – выемочные блоки; 11 – буровой агрегат; 12 – компенсационная полость; 13 – скважины малого диаметра; 14 – одноковшовый погрузчик; 15 – автосамосвал; 16 – колесный скрепер

Fig. 2. Mining diagram of adjacent mining blocks: 1 is high-grade ore; 2 is run-of-mine ore; 3 is low-grade ore; 4 is barren rock; 5 is high-grade ore mass; 6 is run-of-mine and low-grade ore mass; 7 is ore-free rock mass; 8 is blast holes; 9, 10 are mining blocks; 11 is a drilling machine; 12 is compensating space; 13 is small-diameter wells; 14 is a single-bucket loader; 15 is a dump truck; 16 is a wheel scraper

Оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами, дезинтегрируется взрывной подготовкой с обычными параметрами взрывных скважин и их сеткой. Для сохранения геологической структуры массива при использовании взрывной подготовки применяются специальные методы, в частности взрывание на буферный слой, образованный в результате предыдущего взрыва и примыкающий к откосу уступа, что позволяет обеспечить сравнительно небольшое смещение взорванной горной массы в блоке и низкий коэффициент разрыхления (в пределах 1,15). Помимо максимального возможного сохранения структуры взываемого блока (для последующей селективной выемки) достигается более полное использование энергии взрыва на дробление породы; сокращение времени на вспомогательные операции; более эффективная работа выемочного оборудования. В качестве буферного слоя используется ранее взорванный выемочный блок 10, который подготавливается к выемке аналогичным образом. Из развала пород взорванного выемочного блока 10 ведется селективная выемка трех типов горной массы: богатой рудной массы; рядовой и бедной рудной массы; безрудной горной массы. Селективная выемка различными типами горного оборудования осуществляется на основе планограммы, в которой указаны последовательность разбора блока и рекомендуемые траектории движения машин. В настоящее время разработаны автоматизированные системы управления процессом селективной выемки рудной массы, обеспечивающие высокоточное позиционирование выемочного оборудования в забое, необходимую траекторию движения ковша относительно зон локализации различных типов горной массы, а также возможность идентификации качества горной массы в ковше [17]. При экскавации горной массы из взорванного сложноструктурного выемочного блока полнота и качество извлечения полезного ископаемого зависят от принятой выемочной техники и выбора технологической последовательности разбора развала [18].

Выемку богатой рудной массы целесообразно вести одинковшовыми погрузчиками или экскаваторами с ковшами ограниченной вместимости, в данном случае контролю качества селекции будет способствовать визуально различимый менее крупный гранулометрический состав богатой рудной массы, полученный в результате взрываания частой сети скважин малого диаметра. Для увеличения глубины селекции и максимального сохранения качества богатых руд при

отработке зон контакта с рядовыми рудами может быть использован одинковшовный погрузчик со специальным оборудованием, разработанный авторами [19]. Ковш погрузчика оборудован поворотным козырьком для разделения разносортной рудной массы в приконтактной зоне и повышения коэффициента заполнения ковша. После погрузки в автосамосвалы богатая рудная масса транспортируется на специальный склад и в последующем используется для стабилизации качества усредненной рядовой и бедной рудной массы, поступающей на обогащение.

Извлечение рядовой и бедной рудной массы должно вестись в режиме усреднения, при этом в случае горизонтальной (площадной) вариативности содержаний полезного компонента выемка может осуществляться колесными скреперами. Для повышения производительности колесных скреперов при послойной выемке взорванной рудной массы авторами предлагается конструкция усовершенствованного скрепера с удлиненным ковшом с интенсификатором загрузки рудной массы в виде подгребающей стенки [7]. Удлиненный ковш скрепера заполняется за счет силы тяги. После того как рудная масса заполняет переднюю часть ковша, в работу включается подгребающая стенка и перемещает рудную массу в заднюю часть ковша, затем освободившаяся передняя часть ковша вновь заполняется за счет силы тяги скрепера. Конструкция интенсификатора позволяет работать с крупнокусковой горной массой и обеспечивает высокий коэффициент заполнения удлиненного ковша. При вертикальной вариативности содержаний полезного компонента рядовой и бедной рудной массы выемку целесообразно вести одинковшовыми экскаваторами с усреднением разносортной руды в ковше в процессе черпания с последующей погрузкой в автосамосвалы.

Выемку породных включений (безрудной горной массы) в зависимости от их размеров и формы ведется одинковшовыми погрузчиками или экскаваторами, после чего породную массу автосамосвалами транспортируют в породный отвал.

В случае освоения пластовых месторождений, сложенных породами невысокой прочности, возможно вести послойную отработку массива с применением карьерных комбайнов [20]. Как правило, низкопрочные руды пластовых месторождений характеризуются выдержаными параметрами в плане при относительно выраженной изменчивости в разрезе, поэтому для оконтуривания массива с выделением выемочных единиц достаточно проводить только опежающую эксплуатационную разведку.

На обогатительной фабрике штучные руды с содержанием золота  $\text{px}100$  г/т отдельно подвергают гравитационному обогащению с получением концентрата («золотой головки») с  $\text{px}$  кг/т, отправляемого непосредственно на плавку со сквозным извлечением металла 93–95%. Пром-продукт гравитационного обогащения объединяют с флотационным и подвергают сорбционному цианированию. Усредненная рядовая и бедная руда после подщихтовки с богатой рудой (для стабилизации среднего содержания) перерабатывается флотационным методом с последующим сверхтонким измельчением полученного концентрата и сорбционным цианированием (чановым выщелачиванием) со сквозным выходом металла 85–90%. В случае, если в богатой руде содержатся крупные золотины, то до подщихтовки она подвергается гравитационному обогащению. Хвосты флотации подвергаются кучному или кюветному выщелачиванию совместно с кеками цианирования с выходом металла в пределах 60–70%. Таким образом, общее извлечение металла из руд сложноструктурного блока может составлять 85–87%.

В случае исключения внутрирудной селекции с традиционным усреднением руд, производящимся в процессе валовой выемки, транспортировки, складирования и усреднения в бункерах, с последующим дроблением, измельчением, флотационным обогащением, тонким измельчением и сорбционным цианированием, сквозное извлечение металла может составлять порядка 75%. Такое сравнительно невысокое извлечение обуславливается потерями золота от недорас-

творения крупных золотин и сростков, а также переосаждения крупного золота на стадии флотации.

### **Заключение**

Высокая вариативность содержаний полезных компонентов в рудах месторождений штокверкового типа предопределяет необходимость их селективной выемки, при этом наиболее богатые рудные участки предлагаются извлекать с опережающей селекцией путем выбуривания. Комбинация механической выемки и дифференцированной взрывной подготовки руд позволяет в последующем оказывать существенное влияние на показатели извлечения при добыче и переработке. Выбуривание локальных участков позволяет существенно увеличить глубину селекции и максимально сохранить исходные качественные характеристики полезного ископаемого в массиве, что особенно важно для месторождений руд высокого кристаллического сырья. Взрывная подготовка зон богатой руды с получением мелкокусковой рудной массы обеспечивает ее эффективную селективную выемку ковшовыми рабочими органами небольшой вместимости. Выделение богатой руды, отправка ее на усреднительный склад позволяют обеспечивать стабильное качество усредненной рудной массы при шихтовке бедных и рядовых руд. Раздельная переработка штучных и усредненных руд, а также промпродуктов от предыдущих процессов обогащения позволяет получить высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока.

### **Список литературы**

1. Трубецкой К.Н., Шапарп А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. Software & Systems Modeling. 2014. vol. 13, no. 3. pp. 941–962.
3. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений / Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталаев И.А. // Горный журнал. 2017. № 11. С. 60–64.
4. 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.
5. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
6. Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы комбинирования горных технологий при производстве цветных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 4–10.
7. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Intensification of Open Mining Operations with a Small Distance of Transportation of Rock Mass // International Journal of Engineering Research in Africa, 2018, vol. 38, pp. 100–114.
8. Gladys A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the streltsov ore field geo-dynamic testing area // e3s web of conferences electronic resource. 2018. Р. 02012.
9. Формирование руды повышенного качества из добываемой рудной массы – одно из условий рациональной технологии ее переработки / Терещенко С.В., Марчевская В.В., Маслов А.Д., Голованов В.Г., Погребняк

O.C. // Вестник Мурманского государственного технического университета. 1998. Т. 1. № 3. С. 111–118.

10. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра, 1980. 631 с.
11. Секисов Г.В., Таскаев А.А. Раздельная выемка руд на карьерах. Фрунзе: ИЛИМ, 1986. 173 с.
12. Безвзрывные технологии подготовки скальных горных пород к перемещению конвейерным транспортом / Бурцев С.В., Левченко Я.В., Таланин В.В., Ворошилин К.С. // Уголь. 2018. № 10. С. 8–17.
13. Михайлов Ю.В., Васильев А.Е., Горный С.В. Подготовка рудного тела к выемке полезного ископаемого комбинированным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С.114–116.
14. Пат. 2464421 Российская Федерация, Е21C 41/22, Е21C 37/16, F42D 3/04. Извлечение руды с использованием взрыва и термического дробления / Д. Бризбуза; заявитель и патентообладатель Рокмек Интернэшнл Инк. № 2010107457/03; заявл. 24.07.2008; опубл. 20.10.2012.
15. Демшина Н. Сверху вниз и обратно // Промышленные страницы Сибири. 2015. № 2. С. 48–50.
16. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N., Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S., Zykov N.V. Promising mining technologies for gold placers in Transbaikalia // Journal of Mining Science, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 489–496.
17. Технология формирования качества руд Тырынаузыского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения / Хакулов В.А., Крапивский Е.И., Блаев Б.Х., Шаповалов В.А. // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 33–39.
18. Санакулов К.С., Руднев С.В., Канцель А.В. О возможности отработки месторождения Учкулач с использованием технологии рентгенрадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1. С. 17–20.
19. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Автоматизация процессов разработки сложноструктурных месторождений с применением машин послойного фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2019. № 2. С. 220–229.
20. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia // Zement-Kalk-Gips Int. 2014, vol. 67, no. 10, pp. 18–19.

#### References

1. Trubetskoy K.N., Sharap A.G. *Malootkhodnye i resursosberegayushchie tekhnologii pri otkrytoj razrabotke mestorozhdenij: monografiya* [Low-waste and resource-saving technologies in open pit mining: monograph]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. Software & Systems Modeling, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
3. Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A. Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 60-64. (In Russ.)
4. 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.
5. Adams M. D. Gold ore processing: project development and operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
6. Golik V.I. Dmitrak Yu.V. Prospects of using a combination of mining techniques in the production of non-ferrous metals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 4–10. (In Russ.)
7. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass. International Journal of Engineering Research in Africa, 2018, vol. 38, pp. 100–114.
8. Gladyr A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the Streletsov ore field geodynamic testing area. E3S Web of Conferences, 2018, p. 02012.
9. Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Maslov A.D., Golovanov V.G., Pogrebnyak O.S. Preparing high quality ore from mined ore mass is one of the conditions for a rational technology for its processing. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Murmansk State Technical University], 1998, vol. 1, no. 3, pp. 111–118. (In Russ.)
10. Rzhevsky V.V. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya otkrytykh gornykh rabot* [Technology and comprehensive mechanization of open cast mining]. Moscow: Nedra, 1980, 631 p. (In Russ.)
11. Sekisov G.V., Taskaev A.A. *Razdelnaya vyemka rud na karierakh* [Separate ore mining in quarries]. Frunze: ILIM, 1986, 173 p. (In Russ.)
12. Burtsev S.V., Levchenko Ya.V., Talanin V.V., Voroshilin K.S. Blastless technologies for rock mass conditioning for conveyor transportation. *Ugol* [Coal], 2018, no. 10, pp. 8–17. (In Russ.)
13. Mikhailov Yu.V., Vasiliev A.E., Gorny S.V. Preparation of the ore body for the extraction of minerals in a combined way. *Gorniy informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2003, no. 8, pp. 114–116. (In Russ.)
14. Brisebois D. *Izvlechenie rudy s ispolzovaniem vzryva i termicheskogo drobleniya* [Ore extraction using explosion and thermal crushing]. Patent RF, no. 2464421, 2012.
15. Demshina N. From top to bottom and back. *Promyshlennye stranitsy Sibiri*. [Industrial Pages of Siberia], 2015, no. 2, pp. 48–50. (In Russ.)

16. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N., Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S., Zykov N.V. Promising mining technologies for gold placers in Transbaikalia. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no 3. pp. 489–496.
17. Khakulov V.A., Krapivskiy E.I., Blaev B.Kh., Shapovalov V.A. Quality formation technology for the Tyrnyauz deposit ores using preliminary sorting and beneficiation. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation], 2018, no. 5, pp. 33–39. (In Russ.)
18. Sanakulov K.S., Rudnev S.V., Kantsel A.V. On the possibility of mining the Uchkulach deposit using X-ray radio-metric concentration technology of lead-zinc ores. *Gorny vestnik Uzbekistana* [Mining Vestnik of Uzbekistan], 2011, no. 1, pp. 17–20. (In Russ.)
19. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Automation of processes for developing complex structure deposits by applying surface excavating milling machines. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences], 2019, no. 2, pp. 220–229. (In Russ.)
20. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus, Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, 67, no. 10, pp. 18–19.

Поступила 23.06.2020; принята к публикации 10.08.2020; опубликована 25.09.2020

Submitted 23/06/2020; revised 10/08/2020; published 25/09/2020

**Чебан Антон Юрьевич** – ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Email: chebanay@mail.ru

**Секисов Геннадий Валентинович** – главный научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Email: sekisovag@mail.ru

**Anton Yu. Cheban** – Leading Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia. Email: chebanay@mail.ru

**Gennady V. Sekisov** – Chief Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia. Email: sekisovag@mail.ru