

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫЕМКИ РУД

Чебан А.Ю., Секисов А.Г.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

**Аннотация.** **Актуальность и цель исследования.** Месторождения руд благородных и цветных металлов преимущественно имеют сложную структуру с высокой изменчивостью содержаний полезных компонентов в массиве, в связи с чем их разработка с применением взрывного рыхления приводит к существенному перемешиванию сортов и разубоживанию руд, что в дальнейшем ведет к увеличению затрат на обогащение и снижению сквозного извлечения полезных компонентов. Известные комбинированные схемы разработки, предполагающие механическую выемку особо богатых руд путем выбуривания, не обеспечивают выявления точных контуров зон богатых и особо богатых руд, а также не позволяют производить опережающую выемку всего объема особо ценного сырья из массива. **Цель работы.** Совершенствование технологии комбинированной разработки сложноструктурных рудных месторождений путем уточнения контуров зон богатых и особо богатых руд, подбора комплекта оборудования для обеспечения их качественной селективной выемки, а также обоснование эффективности дезинтеграции относительно прочных руд растворами поверхностно-активных веществ. **Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования по разупрочнению образцов скальных пород средней трудности разрушения раствором поверхностно-активных веществ показали существенное снижение их прочности на одноосное сжатие и растяжение. В статье предлагается усовершенствованная технология разработки, заключающаяся в формировании сети взрывных скважин, одновременно являющихся прободоотборными выработками на первой стадии сопровождающей разведки. При выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента осуществляется вторая стадия сопровождающей разведки с локальным сгущением сети скважин меньшего диаметра и поинтервальным опробованием, на основании данных которой производится оконтуривание включений богатых и особо богатых руд в плане и по вертикали. Полученная сгущенная сеть скважин в дальнейшем используется для пропитки массива раствором поверхностно-активных веществ. Опережающее рыхление и выемка локальных участков особо богатых руд осуществляется гидравлическим экскаватором, оснащенным сменным оборудованием в виде гидравлического молота и гидравлического грейфера. Оставшаяся часть массива рыхлится взрывом, после чего производится извлечение рудной массы карьерным экскаватором. **Выводы.** Предлагаемая технология позволяет уточнить контуры богатых и особо богатых руд в массиве. Применение гидравлического молота позволяет производить отбойку особо богатых руд по границам выявленного контура с минимизацией перемешивания сортов, что увеличит извлечение полезных компонентов при последующей переработке ценного минерального сырья.

**Ключевые слова:** особо богатые руды, поверхностно-активные вещества, разупрочнение, опережающая механическая выемка, экскаватор, гидравлический молот, производительность

© Чебан А.Ю., Секисов А.Г., 2022

### Для цитирования

Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 35-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44>



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

# IMPROVEMENT IN THE TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF COMPLEX DEPOSITS APPLYING COMBINED ORE EXTRACTION

Cheban A.Yu., Sekisov A.G.

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

**Abstract. Relevance and objective of the study.** Precious and non-ferrous metal ore deposits mainly have a complex structure with a high variability in the content of useful components in the massif; therefore, their development using the blasting loosening leads to a significant regrading and dilution of ores, subsequently leading to an increase in the cost of enrichment and a decrease in the throughout extraction of useful components. The well-known combined development schemes, which involve the mechanical extraction of especially rich ores by drilling, do not provide for the identification of the exact contours of zones of rich and especially rich ores, and also do not allow for the advance extraction of the entire volume of especially valuable raw materials from the massif. **Objective.** Improving the technology of combined development of complex structure ore deposits by clarifying the contours of zones of rich and especially rich ores, selecting a set of equipment to ensure their high-quality selective extraction, as well as substantiating efficiency of disintegration of relatively strong ores with solutions of surfactants. **Results.** The conducted experimental studies on the softening of medium-hard rock samples with a solution of surfactants showed a significant decrease in their strength in uniaxial compression and tension. The paper proposes an improved development technology, which consists in the formation of a network of blast holes, which are at the same time sample workings at the first stage of an accompanying exploration. When zones with a high content of a useful component are identified, the second stage of the accompanying exploration is carried out, including a local thickening of the network of the holes of a smaller diameter and interval sampling, leading to outlining rich and especially rich ores laterally and vertically. Then the resulting dense network of the holes is used to impregnate the massif with a solution of surfactants. Advanced loosening and excavation of local areas of especially rich ores is carried out by a hydraulic excavator equipped with interchangeable equipment, such as a hydraulic hammer and a hydraulic grab. The rest of the massif is loosened by blasting, and then the ore mass is extracted with an open-pit excavator. **Conclusions.** The proposed technology is used to specify the contours of rich and especially rich ores in the massif. Hydraulic hammers are used to break especially rich ores along the boundaries of the identified contour with a minimal regrading, increasing the extraction of useful components during the subsequent processing of valuable mineral raw materials

**Keywords:** especially rich ores, surfactants, softening, advanced mechanical mining, excavator, hydraulic hammer, productivity

## For citation

Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Improvement in the Technology for the Development of Complex Deposits Applying Combined Ore Extraction. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 35-44. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-35-44>

## Введение

Месторождения руд благородных и цветных металлов преимущественно имеют сложную структуру с высокой изменчивостью содержаний полезных компонентов в массиве [1, 2]. Разработка сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимого уровня селекции при выемке руд различных сортов приводит к существенному перемешиванию сортов и разубоживанию, что в дальнейшем ведет к увеличению затрат на обогащение и снижению сквозного извлечения полезных компонентов [3-5]. В настоящее время одним из основных направлений повышения эффективности горного производства является комплексное освоение недр с приме-

нием малоотходных, энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий [6, 7]. При этом разработка сложноструктурных массивов должна вестись с выделением выемочных блоков, пригодных к отработке по современным дифференцированным эксплуатационным кондициям, на основе совершенствования систем эксплуатационного опробования, управления запасами и качеством минерального сырья, технологиями его селективной выемки, а также глубокой переработки [1, 8]. Для месторождений штокеркового типа характерны длиннопериодные колебания содержания основного полезного компонента в добываемой руде, что необходимо учитывать при обосновании оптимального варианта режима горных работ [8, 9].

Изменение содержания полезного компонента в руде влияет на эффективность процесса обогащения флотационным методом. С повышением содержания увеличивается извлечение металлов в концентрат, однако после достижения оптимальных параметров процесса обогащения дальнейшее повышение содержания не дает существенного эффекта, в то же время снижение содержания ниже оптимального значения ведет к относительно резкому падению извлечения. Так, при переработке комплексных руд Кальмакырского месторождения рост содержания меди в рудной массе с 2,5 до 3% приводит к увеличению извлечения с 83 до 85%, а снижение содержания с 2,5 до 2,0% ведет к уменьшению извлечения меди в концентрат с 83 до 79,5% [9]. При переработке медно-никелевых руд Талнахского месторождения рост содержания никеля в рудной массе с 2 до 3% приводит к увеличению извлечения с 72 до 76%, а снижение содержания с 2 до 1% ведет к уменьшению извлечения никеля в концентрат с 72 до 56% [10]. Таким образом, прирост извлечения в первом случае не компенсирует потери в последующем. Следовательно, может быть целесообразным использование части руд с относительно высоким содержанием полезного компонента для подшихтовки руд, имеющих содержание полезного компонента ниже оптимального значения с целью увеличения суммарного выхода металла по всем сортам руд.

Существенное влияние на полноту извлечения металлов при переработке руд оказывает изменчивость содержания металла в руде. Так, при переработке руд Кальмакырского месторождения с содержанием металла в руде 2% при увеличении среднеквадратичного отклонения содержания с 0,1 до 0,2% извлечение меди в концентрат снижалось на 2,1% [9]. При уменьшении изменчивости содержания никеля с 0,1 до 0,01% в рудной массе рудника «Заполярный» извлечение никеля в концентрат возрастало с 65 до 78% [11]. Очевидно, что наибольшая изменчивость содержаний будет появляться при перемешивании богатых и особо богатых руд с рядовыми, что приведет к нестабильному качеству потока руды и снижению общего извлечения металла. Особо большая изменчивость содержаний характерна для золоторудных месторождений. Так, согласно данным работы [12], на участке одного из золоторудных месторождений особо богатые и богатые руды со средним содержанием металла 50,83 и 26,05 г/т, при объеме в блоке 1,54 и 6,75% содержат 17,51 и 30,76% металла соответственно, при этом среднее со-

держание металла в рядовой и бедной руде составляет 4,47 и 1,22 г/т соответственно. Таким образом, селективная выемка различных сортов руд должна обеспечивать уменьшение изменчивости содержания металла в рудной массе как в случае ее последующего усреднения, так и при переработке разных сортов руд по отдельным технологиям.

Обеспечить повышение качества селекции при разработке месторождений позволяют безвзрывные технологии с применением механических средств выемки. В настоящее время развитие горного оборудования позволяет вести эффективную массовую выемку все более прочных горных пород без их предварительного взрывного рыхления [13, 14]. Так, карьерные комбайны, рыхлительные агрегаты, одноковшовые экскаваторы со специальным рабочим оборудованием в виде гидромолотов, гидрорипперов, скальных ковшей и др. позволяют вести разработку плотных, полускальных и легко разрабатываемых скальных горных пород с прочностью на одноосное сжатие до 600-1000 кг/см<sup>2</sup> [15, 16]. При работе с более прочными породами эффективность механической выемки существенно снижается, в результате чего предпочтительнее становятся технологические схемы с применением взрывного рыхления массива.

Для снижения негативного воздействия взрыва при разработке сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья предлагаются комбинированные технологические схемы с применением локальной механической выемки особо богатых руд и взрывного рыхления остального массива [5, 17]. В работе [17] предлагается при выявлении в ходе сопровождающей разведки зон особо богатых руд производить их выбуривание с применением бурового агрегата, при этом для повышения производительности возможна заливка в скважины раствора поверхностно-активных веществ (ПАВ) с целью разупрочнения зоны особо богатых руд. Зоны богатых руд обустраиваются шпурами или скважинами малого диаметра по сгущенной сети для получения мелкокусковой рудной массы, а оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами подготавливается к взрывному рыхлению с использованием взрывных скважин и их сетки с обычными параметрами. Добытая селективно особо богатая руда может быть направлена на автоклавное выщелачивание, которое обеспечит наиболее высокие показатели извлечения металла. Технология, представленная в

работе [17], имеет ряд недостатков. Во-первых, оконтуривание зон богатых и особо богатых руд ведется с учетом данных сопровождающей разведки по обычной сети взрывных скважин, отстоящих друг от друга на расстоянии 4-5 м, с усреднением содержания полезного компонента по всей высоте выемочного блока, в связи с относительно небольшими размерами данных зон построенные и фактические контуры как в плане, так и по глубине могут значительно различаться. Во-вторых, в процессе механической выемки буровым агрегатом расширение скважины производится с получением выработки круглой формы, которая может несоответствовать реальным контурам зоны особо богатых руд, что не позволит селективно извлечь весь объем особо богатой руды. В-третьих, заливка раствора ПАВ во взрывные скважины, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, не обеспечивает достаточно равномерного и интенсивного разупрочнения массива, кроме того, в научной литературе практически отсутствуют данные по результатам разупрочнения растворами ПАВ относительно прочных руд, в связи с чем трудно оценить возможность их эффективного механического извлечения.

Целью данного исследования является совершенствование технологии комбинированной разработки сложноструктурных рудных месторождений путем уточнения контуров зон богатых и особо богатых руд, подбора комплекта оборудования для обеспечения их качественной селективной выемки, а также обоснования эффективности дезинтеграции относительно прочных руд растворами ПАВ.

### Разупрочнение горных пород

Способ разупрочнения горных пород с применением растворов ПАВ заключается в предварительной обработке (пропитке) массива через формируемые выработки (скважины, шпуры, щели). Молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности разрушаемой породы, понижая поверхностную энергию и оказывая влияние на ее механические характеристики. Известны исследования по применению растворов ПАВ для разупрочнения различных горных пород преимущественно полускальных и легко разрабатываемых скальных, таких как кимберлиты, конгломераты, песчаники, аргиллиты, известняки и др. [14, 18]. Так, на Талдинском угольном месторождении при пропитке массива раствором ПАВ через сеть скважин  $1,3 \times 1,3$  м в течение двух суток прочность на сжатие снизилась у аргиллитов и алевролитов с 90 до

70 МПа, а у мелкозернистых песчаников – с 93 до 60 МПа [14]. Разупрочненные вскрышные породы предлагалось разрабатывать с помощью карьерных комбайнов типа КСМ. Исследования по разупрочнению кимберлитов растворами ПАВ показали снижение прочности на сжатие примерно на 50%, что позволяет существенно повысить эффективность их механической разработки горными комбайнами или гидравлическими экскаваторами [18]. Недостатком предлагаемых технологий является необходимость бурения специальной сгущенной сети скважин для пропитки массива раствором ПАВ. Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время предварительному разупрочнению с применением растворов ПАВ подвергаются преимущественно легко разрабатываемые скальные породы с прочностью на одноосное сжатие 500-1000 кг/см<sup>2</sup> для повышения производительности последующей массовой механической выемки. Металлорудные месторождения преимущественно сложены скальными породами средней трудности разрушения (кварциты, порфириды, березиты и др.) и трудноразрушаемыми скальными породами (андезитовые порфириды, роговики, скарны окремненные и др.). Поэтому их массовое механическое рыхление при нынешнем развитии технических средств даже после предварительного разупрочнения невозможно с требуемой производительностью и экономически нецелесообразно в сравнении с взрывным рыхлением. Однако локальная механическая глубокоселективная выемка особо богатых руд в связи с высокой ценностью минерального сырья может быть приемлема, несмотря на относительно невысокую производительность.

Для обоснования возможности реализации безвзрывной технологии разработки скальных пород средней трудности разрушения были проведены экспериментальные исследования по разупрочнению золотосодержащих руд одного из месторождений Забайкальского края с определением прочности образцов на одноосное сжатие и растяжение. Цилиндрические образцы выпиливались из геологоразведочных кернов диаметром 63 мм. С целью получения надежных значений для каждой из горных пород делались выборки по 16-20 образцов, половина из которых оставлялась в естественном состоянии, а другая половина пропитывалась раствором ПАВ в течение двух суток. Предел прочности пород на одноосное сжатие определялся в соответствии с ГОСТ 21153.2-84, а на одноосное растяжение – в соответствии с ГОСТ 21153.3-85. Эксперимен-



тальные исследования проводились с применением оборудования Центра коллективного пользования по исследованию минерального сырья Института горного дела ДВО РАН. Для определения прочности пород при одноосном сжатии использовалась испытательная машина Topi-РАСТ II (Германия), между стальными плитами которой устанавливались цилиндрические образцы, нагружаемые с равномерной скоростью 3 МПа/с. Испытание на одноосное растяжение проводилось на установке TopiNORM (Германия) с размещением образцов между сферическими инденторами и последующим равномерным нагружением, равным 1 кН/с. Обработка результатов испытаний выборки образцов включала в себя вычисление среднего арифметического значения предела прочности, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации. Результаты экспериментальных исследований по определению прочности горных пород представлены в **таблице**.

Обработка образцов руд раствором ПАВ привела к существенному снижению их прочностных характеристик. Так, прочность на одноосное сжатие кварц-гидрослюдистых метасоматитов, березитов, хлоритов снизилась на 42,3, 32,4 и 21,2% соответственно. А прочность на одноосное растяжение кварц-гидрослюдистых метасоматитов, березитов, хлоритов снизилась на 40,8, 32,7 и 26,4% соответственно. Наименьшее изменение прочностных свойств было выявлено у роговиков с уменьшением прочности на одноосное сжатие на 12,9% и на одноосное растяжение – на 2,2%.

В настоящее время гидравлические молоты используются в различных отраслях производства, в том числе при ведении горных работ для рыхления массивов и дробления негабаритов. Учитывая необходимость разрушения относительно больших объемов пород, в горном производстве применяются тяжелые гидравлические молоты, устанавливаемые на экскаваторы с вме-

стимостью ковша от 1,5 м<sup>3</sup> и более. Так, тяжелый гидравлический молот НР 5000 фирмы INDECO (Италия) имеет энергию удара 5000 Дж, массу – 3150 кг, длину – 2,93 м, диаметр рабочего инструмента – 0,16 м и может устанавливаться на экскаваторы массой более 27 т [19]. Производительность гидравлических молотов зависит от прочности горных пород, а также от вида выполняемых работ. Наибольшую производительность экскаватор с гидравлическим молотом развивает при дроблении негабарита (вторичное дробление), а наименьшую – при проходке траншей (**рис. 1**).

Так, производительность гидравлического молота НР 5000 при рыхлении массива (первичное дробление), сложенного горными породами с прочностью на сжатие 1000 кг/см<sup>2</sup>, составляет примерно 260 м<sup>3</sup> за восьмичасовую смену, а при отрывке траншеи – около 110 м<sup>3</sup>/см. При снижении прочности разрабатываемого массива производительность гидравлического молота существенно возрастает. Если с учетом данных экспериментальных исследований прочность березитов на одноосное сжатие при обработке их раствором ПАВ снизится с 1380 кг/см<sup>2</sup> в естественном состоянии до 932 кг/см<sup>2</sup>, то производительность экскаватора с гидравлическим молотом НР 5000 при проходке траншеи увеличится с 55 до 120 м<sup>3</sup>/см, то есть в 2,18 раза. При снижении прочности хлоритов с 1013 до 798 кг/см<sup>2</sup> производительность данного оборудования ориентировочно увеличится со 103 до 160 м<sup>3</sup>/см, то есть в 1,55 раза. При снижении прочности кварц-гидрослюдистых метасоматитов с 1101 до 635 кг/см<sup>2</sup> можно ожидать роста производительности с 82 до 235 м<sup>3</sup>/см, то есть в 2,87 раза. Укрупненные технико-экономические расчеты показывают, что обеспечение такого существенного роста производительности экскаватора с гидравлическим молотом позволит вести экономически эффективную механическую выемку особо богатых и богатых руд.

Таблица. Экспериментальные данные по определению прочности горных пород, кг/см<sup>2</sup>  
Table. Experimental data to determine the strength of rocks, kg/cm<sup>2</sup>

Горная порода	Прочность при одноосном сжатии		Прочность при одноосном растяжении	
	в естественном состоянии	после обработки раствором ПАВ	в естественном состоянии	после обработки раствором ПАВ
Роговики	1844	1605	56,1	54,9
Березиты	1380	932	51,3	37,6
Хлориты	1013	798	57,4	38,7
Кварц-гидрослюдистые метасоматиты	1101	635	62,4	36,9

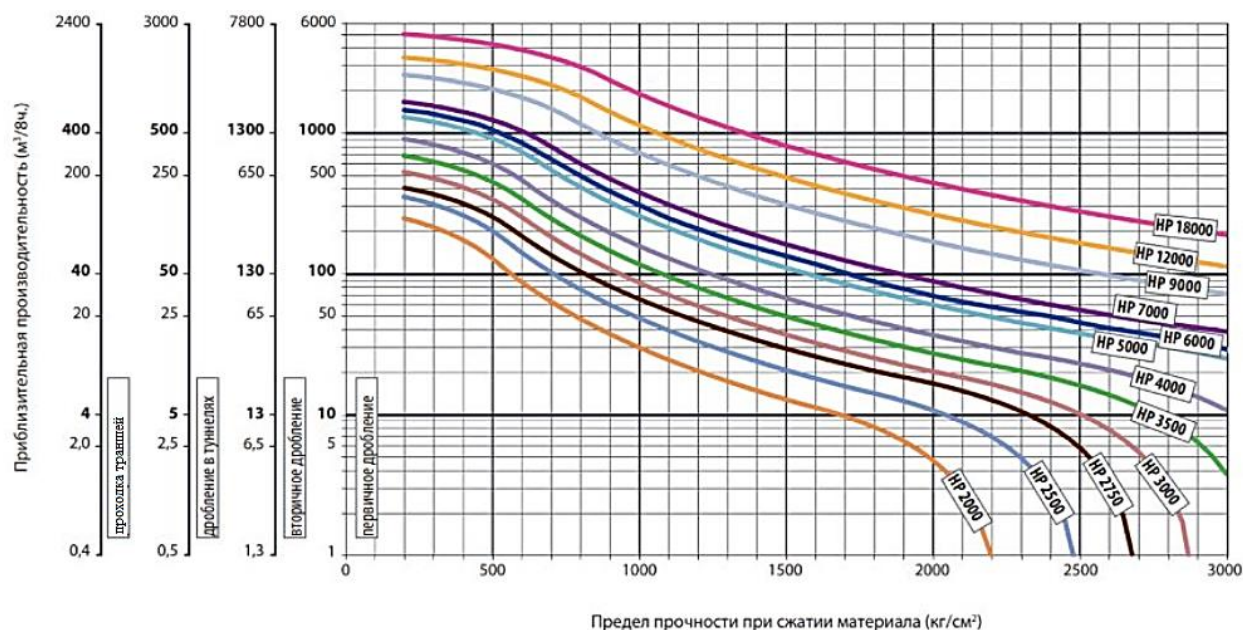


Рис. 1. Графики зависимости производительности гидравлических молотов фирмы INDECO от прочности материала на сжатие для различных видов работ [19]

Fig. 1. Graphs of the performance of INDECO hydraulic hammers against compressive strength of the material for various types of work [19]

С учетом высокой прочности роговиков и незначительного снижения их прочности при обработке раствором ПАВ можно ожидать роста производительности с 28 до 38 м³/см, в связи с чем экономически целесообразным будет ведение механической выемки только особо богатых руд.

### Результаты исследования

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается усовершенствованная технология разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки, обеспечивающая повышение точности оконтуривания и увеличение полноты извлечения особо богатых руд. Буровой установкой 1 (рис. 2) ведется формирование сети взрывных скважин 2 с одновременной сопровождающей разведкой, в результате которой выявляются зоны особо богатых, богатых, рядовых, бедных и особо бедных руд, а также пустых пород.

При выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента осуществляется вторая стадия сопровождающей разведки со сгущением сети скважин 3 меньшего диаметра с поинтервальным опробованием бурового материала. На основании данных второй стадии сопровождающей разведки производится оконтуривание включений богатых и особо богатых руд в плане и по вертикали. Полученная сгущенная сеть скважин 3 в дальнейшем используется для про-

питки массива раствором ПАВ, подаваемым из автоцистерны 4. Таким образом, пробуренные скважины 3 малого диаметра имеют двойное назначение. Опережающее рыхление и выемку локальных участков особо богатых руд предлагается осуществлять гидравлическим экскаватором 5, оснащенным сменным оборудованием в виде гидравлического молота 6 и гидравлического грейфера 7. Применение гидравлического молота 6 позволит вести разработку массива в соответствии с фактическими контурами зон особо богатых руд, что уменьшит перемешивание сортов и в последующем снизит изменчивость содержания полезного компонента в рудной массе. После разрыхления слоя руды гидравлический молот 6 посредством специального быстросъемного адаптера заменяется на гидравлический грейфер 7, которым осуществляется черпание рудной массы из полученной выработки 8. Использование гидравлического грейфера 7 обеспечит возможность извлечения разрыхленной рудной массы в стесненных условиях при выемке зон особо богатых руд небольшого объема. В случае обеспечения приемлемых технико-экономических показателей работы гидравлического молота 6 возможно его применение для выемки богатых руд, также предварительно разупрочненных с применением раствора ПАВ. В случае если использование гидравлического молота 6 на выемке богатых руд экономически неэффективно,

осуществляется дифференцированная взрывная подготовка массива. В зоне богатых руд заряды ВВ размещаются в сгущенной сети скважин 3, в результате чего при взрыве получается более равномерная проработка руды с обеспечением меньшего размера кусков рудной массы, при этом ранее полученная выработка 8 используется в качестве компенсационной полости. Для оставшейся части массива используются взрывные скважины 2 и их сеть с обычными параметрами. Руды и породы взорванного массива селективно извлекаются карьерным гидравлическим экскаватором 9 с погрузкой в автосамосвалы.

Особо богатые руды могут быть переработаны с использованием дорогостоящих способов, например с применением автоклавного выщелачивания, что позволит получить наиболее высокие показатели извлечения металла [20]. Отходы обогащения особо богатых руд имеют достаточно высокое содержание полезного компонента для

обеспечения их рентабельной вторичной переработки. Богатые руды могут перерабатываться отдельно либо подшихтовываться к рядовой руде для обеспечения оптимального содержания полезного компонента в рудной массе, поступающей на обогатительную фабрику. Бедные руды направляются на кучное выщелачивание. В случае если для некондиционных (особо бедных) руд после взрывания характерно образование рудной мелочи с повышенным содержанием полезного компонента, то возможно выделять такую обогащенную рудную мелочь из рудной массы и направлять ее на кучное выщелачивание. Отделение обогащенной рудной мелочи, в частности, может осуществляться карьерным экскаватором 9 с просеивающим ковшем непосредственно во время ведения выемочно-погрузочного процесса с направлением рудной мелочи посредством системы пневмотранспортирования в бункер 10 специального транспортного средства [21].

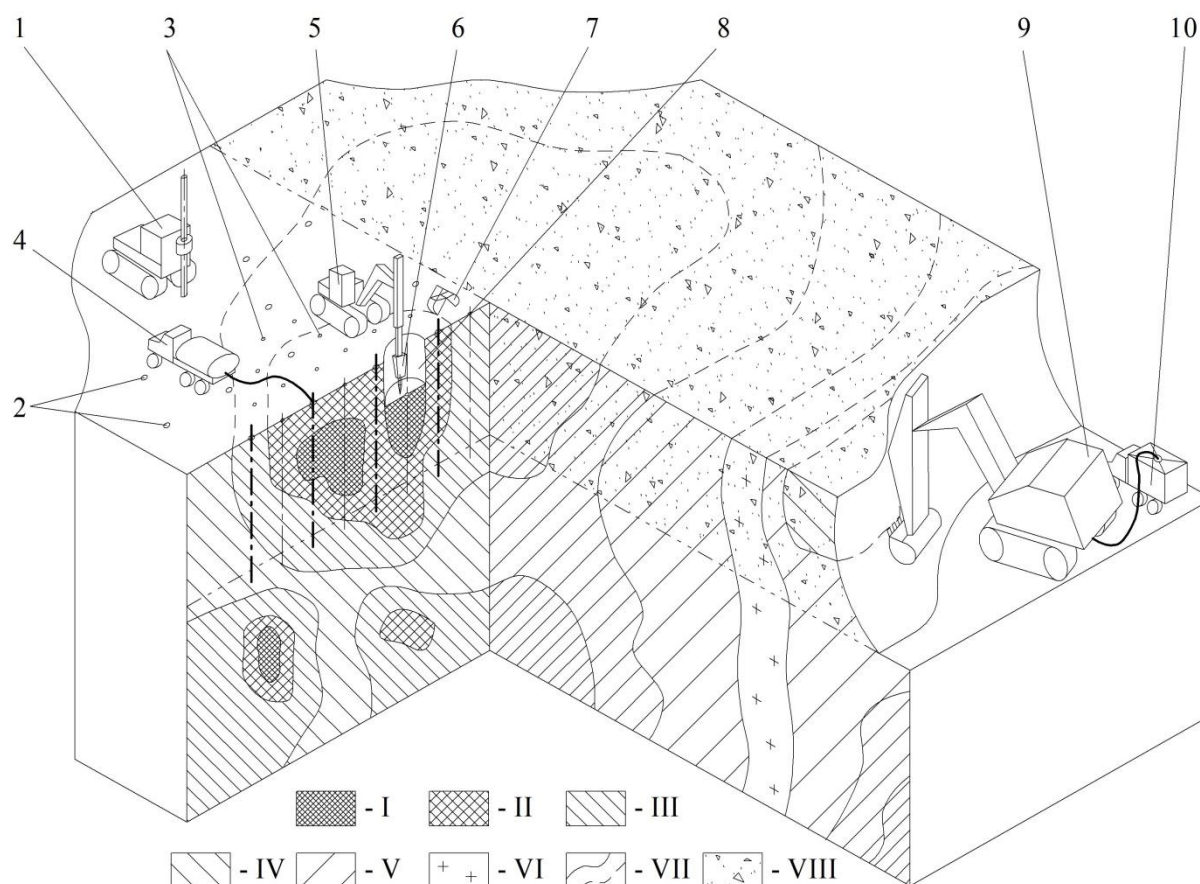


Рис. 2. Схема комбинированной отработки сложноструктурного рудного тела штокверкового типа: I – особо богатая руда; II – богатая руда; III – рядовая руда; IV – бедная руда; V – особо бедная руда; VI – пустые породы; VII – контуры сортов руд; VIII – взорванные руда и порода

Fig. 2. Chart of combined mining of a stockwork type complex ore body: I is especially rich ore; II is rich ore; III is run-of-mine ore; IV is poor ore; V is especially poor ore; VI is waste rocks; VII is contours of ore grades; VIII is exploded ore and rock



## Выводы

Экспериментальные исследования по пропитке образцов скальных пород средней трудности разрушения раствором ПАВ показали снижение их прочности на одноосное сжатие на 21-42% и на одноосное растяжение на 26-41%, при этом наибольший эффект достигнут при разупрочнении кварц-гидрослюдистых метасоматитов. Существенное снижение прочностных характеристик руд за счет пропитки раствором ПАВ позволяет перевести их в класс легкоразрушаемых скальных пород. После предварительного разупрочнения данных горных пород возможно ожидать повышения производительности экскаватора, оснащенного гидравлическим молотом, в 1,55-2,87 раза, что позволит вести экономически эффективную механическую выемку не только особо богатых руд, но также и богатых руд. Экспериментальные исследования по разупрочнению раствором ПАВ роговиков, относящихся к трудноразрушаемым скальным породам, не дали существенных положительных результатов, в связи с чем для данных пород можно рекомендовать лишь локальную механическую выемку зон особо богатых руд после их предварительного разупрочнения. Предлагаемая усовершенствованная технология разработки сложноструктурных месторождений позволяет уточнять контуры особо богатых и богатых руд посредством сгущения сети скважин малого диаметра при выявлении зон с высоким содержанием полезного компонента, в дальнейшем данные скважины используются для разупрочнения горного массива путем заполнения их раствором ПАВ. Гидравлический молот обеспечивает отбойку особо богатых руд по границам выявленного контура с минимизацией перемешивания сортов, что увеличит извлечение полезных компонентов при последующей переработке ценного минерального сырья, а использование гидравлического грейфера позволяет вести выемку разрыхленной рудной массы в стесненных условиях.

## Список источников

1. Батугин С.А., Черный Е.Д. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 344 с.
2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector // *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. P. 7-18.
3. Adams M.D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
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. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57. No. 6. P. 978-985.
6. Trubetskoy K.N., Galchenko Y.P., Shuklin A.S. Experimental research of physical processes in selective extraction of ores and rocks in flat lode mining // *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54. No 2. P. 248-253.
7. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. №1. С. 340-348.
8. Menabde M., Froyland G., Stone P., Yeates, G. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies // *Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series*. 2007. P. 91-100.
9. Юматов Б.П., Секисов Г.В., Буянов М.И. Нормирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах. М.: Недра, 1987. 183 с.
10. Кожиев Х.Х. Укрупненный расчет эффективности управления качеством руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. №8. С. 29-30.
11. 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.
12. Бабич И.Н. Новые возможности оценки контрастности руд в недрах // *Рациональное освоение недр*. 2020. №6. С. 38-46.
13. Ocak I., Seker S.E., Rostami J. Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 80. P. 269-276.
14. Перспективы расширения сферы применения безвзрывных технологий в открытой угледобыче / Ю.И. Анистратов, Р.М. Штейнцга, Г.Я. Воронков, А.Г. Кузнецов, П.Р. Хаспексов // *Горная промышленность*. 1998. №2. С. 14-19.
15. Чебан А.Ю. Способ подготовки прочных горных пород к выемке при ведении строительных и добычных работ // *Механизация строительства*. 2017. №9. С. 20-23.
16. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8 // *International Journal of Technical Research and Applications*. 2016. No 1. P. 224-226.
17. 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.
18. Шоболова Л.П., Коворова В.В. О создании комбинированной технологии разработки кимберлитов с применением жидких и газообразных ПАВ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000. №1. С. 178-179.



19. INDECO. Производительность гидромолота (20.06.2022). Режим доступа: <https://indecorus.ru/podderzhka/kak-opredelit-proizvoditelnost-gidromolota-m3-v-chas/>
  20. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // Minerals. 2021. T.11. №1. С. 1-11.
  21. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 16-22.
- ### References
1. Batugin S.A., Cherny E.D. *Teoreticheskie osnovy oprobovaniya i otsenki zapasov mestorozhdenii* [Theoretical bases of testing and evaluating reserves of deposits]. Novosibirsk: Science. Siberian Enterprise, the Russian Academy of Sciences, 1998, 344 p. (In Russ.)
  2. Espinoza R.D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. Resources Policy, 52, 7-18 (2017).
  3. Adams M.D. Gold ore processing: Project development and operations. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
  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. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. Journal of Mining Science, 57, 6, 978-985 (2021).
  6. Trubetskoy K.N., Galchenko Y.P., Shuklin A.S. Experimental research of physical processes in selective extraction of ores and rocks in flat lode mining. Journal of Mining Science, 54, 2, 248-253 (2018).
  7. Cheban A.Yu. Improving geotechnology of extraction of narrow ore bodies, using a roadheader. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Earth Science Series], 2020, no. 1, pp. 340-348. (In Russ.)
  8. Menabde M., Froyland G., Stone P., Yeates G. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies. Orebody Modeling and Strategic Mine Planning, Spectrum Series, 91-100 (2007).
  9. Yumatov B.P., Sekisov G.V., Buyanov M.I. *Normirovanie i planirovanie polnoty i kachestva vyemki rudy na karerakh* [Rationing and planning of the completeness and quality of ore extraction in quarries]. Moscow: Nedra, 1987, 183 p. (In Russ.)
  10. Kozhiev Kh.Kh. Consolidated calculation of the efficiency of ore quality management. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2006, no. 8, pp. 29-30. (In Russ.)
  11. Lomonosov G.G., Turtygina N.A. Influence of a coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the beneficiation indicators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2015, no. 3, pp. 104-107. (In Russ.)
  12. Babich I.N. New opportunities for evaluating ore contrasts in the interior part of the Earth. *Ratsionalnoe osvoenie neдр* [Mineral Mining & Conservation], 2020, no. 6, pp. 38-46. (In Russ.)
  13. Ocak I., Seker S.E., Rostami J. Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques. Tunnelling and Underground Space Technology, 80, 269-276 (2018).
  14. Anistratov Yu.I., Steintsag R.M., Voronkov G.Ya., Kuznetsov A.G., Khaspekov P.R. Prospects for expanding the scope of application of blastless technologies in open-pit coal mining. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 1998, no. 2, pp. 14-19. (In Russ.)
  15. Cheban A.Yu. The way of preparation of strong rocks to the excavation during construction and mining operations. *Mekhanizatsiya stroitelstva* [Construction Mechanization], 2017, no. 9, pp. 20-23. (In Russ.)
  16. Mohd Im. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8. International Journal of Technical Research and Applications, 1, 224-226 (2016).
  17. 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. (In Russ.)
  18. Shobolova L.P., Kovorova V.V. On the creation of a combined technology for the development of kimberlites using liquid and gaseous surfactants. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2000, no. 1, pp. 178-179. (In Russ.)
  19. INDECO. Hydraulic hammer performance. Available at: <https://indecorus.ru/podderzhka/kak-opredelit-proizvoditelnost-gidromolota-m3-v-chas/> (Accessed on June 20, 2022)
  20. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. Minerals, 11, 1, 1-11 (2021).
  21. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Mining excavator with the capability to separate concentrated ore fines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 1, pp. 16-22. (In Russ.)

Поступила 01.07.2022; принята к публикации 01.09.2022; опубликована 26.09.2022  
Submitted 01/07/2022; revised 01/09/2022; published 26/09/2022

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

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

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

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