ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(4):5-19
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ВЫЕМКЕ ОСОБО БОГАТЫХ РУД

И.Ю. Рассказов[1], А.Г. Секисов[2], А.Ю. Чебан[2]

[1] Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
[2] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия, e-mail: chebanay@mail.ru

Аннотация: Разработка сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимой глубины селекции при выемке приводит к значительному разубоживанию и пересортице руд, особенно при значительном диапазоне содержаний ценных компонентов, а также к увеличению сквозных потерь металлов. Обоснована система показателей, позволяющая оценивать сложность внутренней структуры оруденения, на основании которой принимается алгоритм выбора схем отработки выемочного блока с учетом физико-технических и качественных параметров руд, а также технических характеристик горного оборудования, обеспечивающего глубокую селекцию выемки особо богатых руд. Опережающая селективная выемка включений таких руд и их последующая переработка с применением специальных методов обеспечивает высокое сквозное извлечение металла, при этом полученные хвосты или кеки имеют содержание ценного компонента, достаточное для их рентабельной вторичной переработки относительно низкозатратными методами. Рыхление и выемку особо богатых руд предлагается по возможности проводить механическим способом, в том числе с их предварительным разупрочнением раствором поверхностно-активных веществ, который снижает прочность руд на 20…40% и более. Проведение опережающей выемки в дальнейшем позволит снизить изменчивость содержаний основного объема руд и стабилизирует качество рудной массы, что позволит сократить потери металла при переработке руд с использованием традиционных технологий. Бедные руды, а также выделенные из особо бедных руд кондиционные фракции перерабатываются с применением кучного выщелачивания. Внедрение предлагаемых технологических решений при разработке сложноструктурных месторождений позволит увеличить сквозное извлечение металла на 4…5% и снизить себестоимость продукции.

Ключевые слова: эксплуатационная разведка, структура выемочного блока, особо богатые руды, поверхностно-активные вещества, предварительное разупрочнение, опережающая выемка, экскаватор, погрузчик, специальная буровая установка.

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

© И.Ю. Рассказов, А.Г. Секисов, А.Ю. Чебан. 2023.

Для цитирования: *Рассказов И. Ю., Секисов А. Г., Чебан А. Ю.* Повышение эффективности разработки сложноструктурных месторождений при опережающей выемке особо богатых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 6–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_5.

Enhancement of mining efficiency at structurally complex deposits with advanced extraction of very high-grade ore

I.Yu. Rasskazov[1], A.G. Sekisov[2], A.Yu. Cheban[2]

[1] Khabarovsk Federal Research Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia
[2] Institute of Mining of Far East Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: chebanay@mail.ru

Abstract: Structurally complex mineral deposit mining without profound selectivity of extraction results in substantial dilution and misgrading of ore, especially when a range of contents of useful components is wide, and in the increased end-to-end losses of metals. The authors substantiate a system of indicators to assess the internal structural complexity of an ore body and to be a framework for adopting an extraction flowchart decision procedure with regard to the physicotechnical parameters and quality factors of ore, as well as considering mining equipment specifications toward profound selectivity of very high-grade ore extraction. Advanced extraction of very high-grade ore pockets and their processing using ad hoc methods ensures high end-to-end recovery of metals, while the tailings or cakes afterward have a sufficient content of valuable components for the efficient re-processing by relatively low-cost-techniques. Loosening and extraction of very high-grade ore should be carried out mechanically, including softening by surface-active substances which reduce ore strength by 20–40% and more. Furthermore, advanced extraction of very high-grade ore allows scaling down variability of ore contents later on and enables the stabilized ore quality, which makes it possible to cut down losses of metals in ore processing using traditional approaches. Low-grade ore and standard-quality fractions extracted from very high-grade ore are subjected to heap leaching. The introduction of the proposed process designs in mining of structurally complex deposits can increase the end-to-end metal recovery by 4–5% and decrease the production cost.

Key words: operational exploration, extraction block structure, very high-grade ore, surface-active substances, preliminary loosening, advanced extraction, shovel, loader, special drill rig.

Acknowledgements: The research used the assets of the Equipment Sharing Center for Scientific Evidence Storage and Processing at the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-663.

For citation: Rasskazov I. Yu., Sekisov A. G., Cheban A. Yu. Enhancement of mining efficiency at structurally complex deposits with advanced extraction of very high-grade ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(4):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_5.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к снижению качества запасов многих видов минерального сырья, усложняются горнотехнические и горно-геологические условия разработки месторождений [1 – 4]. Вовлечение в отработку сложноструктурных месторождений

без обеспечения необходимой глубины селекции при выемке приводит к значительному разубоживанию и пересортице руд, которые впоследствии не всегда компенсируются на стадии обогащения, что ведет к увеличению сквозных потерь металлов и интенсивному росту объемов отходов горного производства [5, 6]. В связи с этим развитие горной науки и технологий разработки рудных месторождений должно сопровождаться комплексным решением вопросов последовательности выемки, ресурсосбережения и малоотходности, снижения энергоемкости процессов горных работ и уменьшения их отрицательного воздействия на окружающую среду [7, 8].

Постановка проблемы

Изменение структуры минерально-сырьевой базы происходит не только в количественном, но и в качественном аспекте, что обуславливает проблему извлечения ценных компонентов по унифицированным технологическим схемам и параметрам переработки. Учитывая, что в настоящее время возможно использование различных технологий переработки руд, характеризующихся соответственно и разным уровнем извлечения ценных компонентов, эксплуатационными и капитальными затратами, целесообразно осуществлять оценку эффективности добычи и переработки разнотипно-разносортных руд по альтернативным схемам. Например, при переработке особо богатых руд, которые могут быть непосредственно или после предварительной сортировки переработаны методами автоклавного выщелачивания, интенсивного цианирования после сверхтонкого измельчения, стадийной сорбции, стадийной сорбции-электросорбции и т.д., могут быть параллельно использованы схемы предварительного обогащения рядовых и богатых руд (раздельно или совместно) с получением концентратов; переработка же бедных, забалансовых и разубоженных рядовых руд может в настоящее время производиться методами кучного выщелачивания [9 — 11]. Таким образом, требуется гибкий дифференцированный подход к определению границ сортов руд, выделяемых по содержанию, и разделению руд на геолого-технологические типы по минералого-геохимическим и текстурно-структурным параметрам. При этом также требуется и дифференцированный подход к воздействию на минеральное вещество, с использованием нескольких технологических схем переработки, с гибким регулированием параметров и режимов. Необходимым этапом реализации такого подхода является также глубокая дифференциация объектов выемки и переработки во взаимосвязи с существующими и перспективными техническими средствами для добычи и обогащения. Поэтому рудные тела и в целом тела полезных ископаемых целесообразно рассматривать не как однородные геологические образования, а как систему пространственно-сопряженных зон продуктивной минерализации различных параметров.

Целью работы является повышение сквозного извлечения металлов при освоении сложноструктурных месторождений за счет совершенствования технологических схем добычи и обогащения, с выделением при оконтуривании включений особо богатых руд для их опережающей глубокоселективной выемки и извлечения из нее ценных компонентов по специальным технологиям, при переработке основного объема руды традиционными методами со стабилизацией ее по качественным показателям.

Результаты исследований

Поскольку тела полезных ископаемых являются объектами горного производства, то морфология и условия их зале-

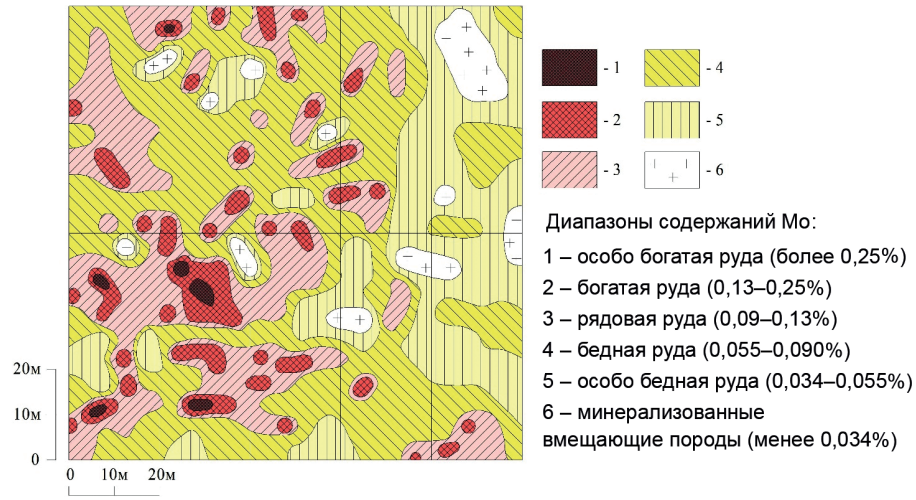


Рис. 1. Сортовой план горизонта 700 участка «Южный» Сорского медно-молибденового месторождения

Fig. 1. Varietal plan of horizon 700 of the «Yuzhny» site of the Sorsk copper-molybdenum deposit

гания существенным образом влияют на выбор способа вскрытия и разработки, использования тех или иных технологических схем добычи и переработки, полноту извлечения полезного ископаемого из недр. Наиболее сложными по структуре являются месторождения штокверкового типа. В процессе проведения опережающей эксплуатационной разведки месторождений появляется новая информация о количестве, качестве и местоположении отдельных рудных включений внутри контуров крупных зон оруденения, которые на стадии перспективного планирования рассматривались как однородные по качеству объекты разработки. Внутри блока могут не только чередоваться руда и пустые породы, но и в рудных телах могут выделяться руды различных типов и сортов. Так, применительно к условиям Сорского медно-молибденового месторождения с учетом данных эксплуатационной разведки ранее отработанных блоков нескольких участков и горизонтов месторождения и применением предложенного в работе [12] критерия оценки эффективности авторами определены рациональные диапазоны содержаний Mo для сортов руд с выделением особо богатых, богатых, рядовых, бедных, особо бедных руд. На рис. 1 представлен сортовой план основного оруденения одного из участков.

Учитывая, что неоднородность руды существенно влияет на показатели ее переработки, необходимо оценивать и сложность внутреннего строения «рудного ядра». Так, в 30,9% объема участка (см. рис. 1), включающего 10 блоков, содержится 50,4% запасов металла. При формировании выемочных блоков по горизонтам важно учитывать требования к отдельным сортам руд, границы естественного оруденения, возможность раздельной выемки разнокачественных руд по простиранию рудного тела с применением горизонтальной или вертикальной селекции после производства рыхления. Проф. Б.П. Юматовым предложено оценивать сложность оруденения соотношением суммарной длины контактов «руда–порода» и площади рудных включений [13].

Развивая данный подход, предлагается оценивать сложность внутренней

структуры рудных включений с применением системы показателей:

$$\begin{cases} K_{Б} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} S_{iБ} + \sum\limits_{i=1}^{n} S_{iO}}{S_{бл}}; \\ \psi_{Б} = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N} L_{iБ} + \sum\limits_{i=1}^{n} \left(L_{iO} K_{ni}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{N} S_{iБ}}; \\ \psi_{р-б} = \dfrac{\sum L_{р-б} + \sum L_{б-о} + \sum L_{о-п}}{S_{бл}\left(1 - K_{Б}\right)}, \end{cases}$$

где $K_{Б}$ — коэффициент, учитывающий площадь включений богатой и особо богатой руды в общей площади эксплуатационного блока; $\psi_{Б}$ — показатель сложности оруденения эксплуатационного блока при наличии в нем богатых и особо богатых включений; $\psi_{р-б}$ — показатель сложности оруденения эксплуатационного блока после опережающего извлечения из него богатых и особо богатых включений; $S_{iБ}$, S_{iO} — площадь богатых и особо богатых включений, соответственно, м^2; N, n — количество богатых и особо богатых включений, соответственно; $S_{бл}$ — площадь эксплуатационного блока; $L_{iБ}$, L_{iO} — длина контактов богатых и особо богатых включений, соответственно, м; $K_{ni} = 1{,}2 \ldots 1{,}5$ — коэффициент, нормирующий последствия от смешивания руд различных сортов, большие значения коэффициента характерны для больших значений ценности руд с учетом содержания полезного компонента; $\Sigma L_{р-б}$, $\Sigma L_{б-о}$, $\Sigma L_{о-п}$ — суммарные длины контактов в эксплуатационном блоке соответственно рядовых и бедных руд, бедных и особо бедных руд, особо бедных руд и пустых (минерализованных вмещающих) пород.

Еще большую изменчивость по содержанию полезного компонента имеют месторождения благородных металлов. Так, в рудных месторождениях золота 25—30% объема руды содержат 70% металла; золотоносные россыпи в 20—40% объема содержат 60—90% металла; рудные урановые месторождения в 20—30% объема содержат более 90% урана [14, 15].

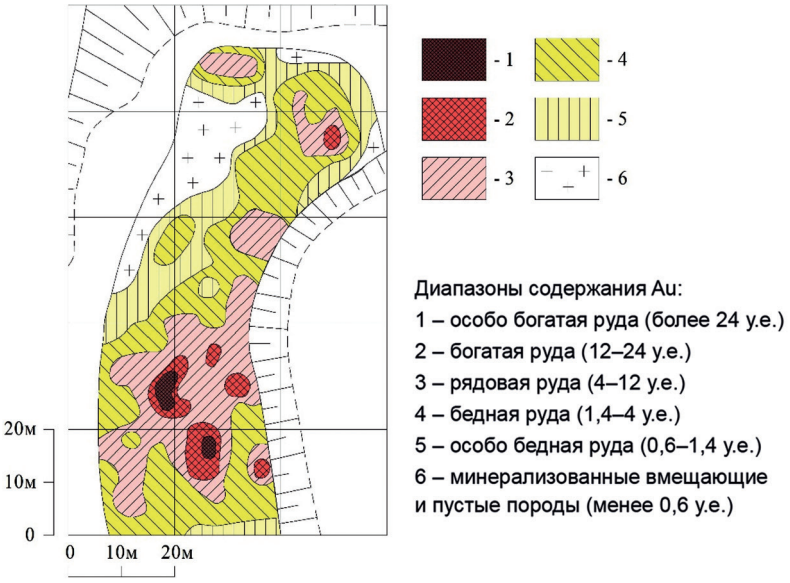
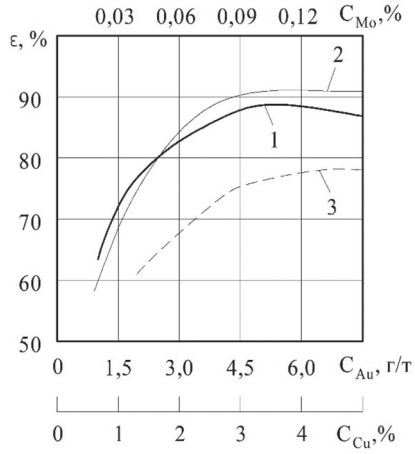
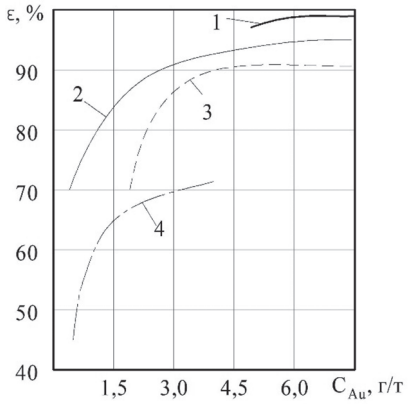


Рис. 2. Сортовой план горизонта 750 Западного блока золоторудного месторождения Талатуй
Fig. 2. Varietal plan of horizon 750 of the Western block of the Talatui gold deposit



1 – золотосодержащая руда месторождения Талатуй
2 – молибденовая руда Сорского месторождения
3 – медная руда месторождения Удокан

Рис. 3. Зависимости извлечения ценных компонентов в концентрат от их содержания в исходной руде при обогащении методом флотации
Fig. 3. Dependences of the extraction of useful components into concentrate on their content in the original ore during enrichment by flotation method



1 – выщелачивание в автоклаве
2 – двухстадийное сорбционное выщелачивание с предокислением
3 – стандартное сорбционное цианирование
4 – кучное выщелачивание

Рис. 4. Зависимости извлечения золота в конечный продукт от содержания в исходной руде месторождения Талатуй при переработке руд различными способами
Fig. 4. Dependences of gold extraction into final product on the content in the initial ore of Talatui deposit during the processing of ores by various methods

Авторами обработаны данные эксплуатационной разведки нескольких участков и горизонтов золоторудного месторождения Талатуй Дарасунского рудного поля (Забайкальский край), на рис. 2 представлен сортовой план горизонта 750 Западного блока. В рассмотренном блоке на долю особо богатых, богатых и рядовых руд приходится 36,9%, при этом содержание металла в них составляет 73,5%, в том числе на 6,7% богатых и особо богатых руд приходится 27,5% металла.

Изменение содержания ценного компонента в руде влияет на эффективность процесса обогащения; с повышением содержания увеличивается извлечение металлов в концентрат [5, 6]. С участием авторов статьи также проведены исследования по определению зависимости извлечения полезных компонентов от их содержания в рудах, на рис. 3, 4 представлены результаты данных исследований, выполнявшихся в МГРИ–РГГУ и ИГД ДВО РАН.

При переработке золотосодержащей руды месторождения Талатуй рост содержания золота в рудной массе с 3,0 до 4,5 г/т обеспечивает увеличение извлечения с 82,7 до 87,9%, а снижение содержания с 3,0 до 1,5 г/т — уменьшение извлечения золота в концентрат с 82,7 до 72,6%. Таким образом, в первом случае прирост извлечения составляет 5,2%, а во втором случае извлечение снизится на 10,1%. Следовательно, в некоторых случаях может быть целесообразно использовать часть руд с относительно высоким содержанием ценного компонента для подшихтовки руд, имеющих содержание ценного компонента ниже рационального значения, с целью увеличения суммарного выхода металла по всем сортам руд. Максимальное извлечение металла в концентрат получено при содержаниях золота 5,0 — 5,5 г/т.

При дальнейшем увеличении содержаний отмечено некоторое снижение извлечения, что можно объяснить чрезмерным повышением в пульпе доли рудных минералов при флотации, приводящим к росту мощности слоя пенного продукта, агрегированию (слипанию) частиц рудных минералов и, соответственно, их обратному переходу в объем пульпы, т.е. в камерный продукт. В связи с этим значительная часть рудных минералов попадает в хвосты переработки и теряется.

Переработка руды месторождения Талатуй с содержанием 5…7 г/т выщелачиванием в автоклаве обеспечило извлечение 97…98% золота в конечный продукт, а применение двухстадийного сорбционного выщелачивания с предокислением позволило извлечь 93…95% металла (см. рис. 4). Переработка особо богатых руд (с содержанием золота десятки грамм на тонну) специальными методами позволяет достигать относительно низкой себестоимости конечного продукта, высокого сквозного извлечения, кроме того, остаточное содержание в хвостах переработки (или кеках) особо богатых руд достаточно для их последующей рентабельной переработки методами физико-химических геотехнологий (кучное, кюветное или скважинное выщелачивание).

Существенное влияние на полноту извлечения металлов при переработке руд также оказывает изменчивость содержания металла в руде, которая в наибольшей степени будет проявляться при перемешивании богатых и особо богатых руд с рядовыми, что приведет к нестабильному качеству потока руды, поступающего на фабрику, и снижению общего извлечения металла.

Предлагаемое решение

Для эффективного освоения сложноструктурных месторождений требуется применение технологических схем, обеспечивающих селективную выемку руд различных сортов с учетом их физико-технических параметров. При отработке сложноструктурного выемочного блока целесообразно обеспечить опережающую высокоселективную выемку включений особо богатых руд до проведения взрывного рыхления блока для исключения их перемешивания с рудами, имеющими существенно более низкое содержание ценного компонента.

На рис. 5 представлена блок-схема алгоритма выбора последовательности открытой разработки сложноструктурных рудных тел штокверкового типа. Открытая разработка включает первую стадию сопровождающей эксплуатационной разведки с бурением взрывных скважин и выделением на основании данных перебура (при отработке вышележащего блока) обогащенных участков, в которых взрывные скважины бурятся с поинтервальным опробованием. По результатам опробования данных перебура и основных скважин уступ может быть разделен на два подуступа. По результатам опробования перебура определяются места бурения взрывных скважин на следующий горизонт, такие скважины опробуются поинтервально. Таким образом, после выявления зон с высоким содержанием полезного компонента ($C_i \geqslant C_б$) осуществляется вторая стадия сопровождающей эксплуатационной разведки, со сгущением сети скважин (меньшего диаметра) с уменьшенным интервалом опробования, на основании данных которой принимается решение о возможности ведения селективной выемки с учетом предложенных показателей сложности оруденения K_E, ψ_E и параметров имеющегося горного оборудования с оконтуриванием включений богатых и особо богатых руд в плане и по вертикали.

Также составляется сортовой план с выделением рядовых, бедных и особо

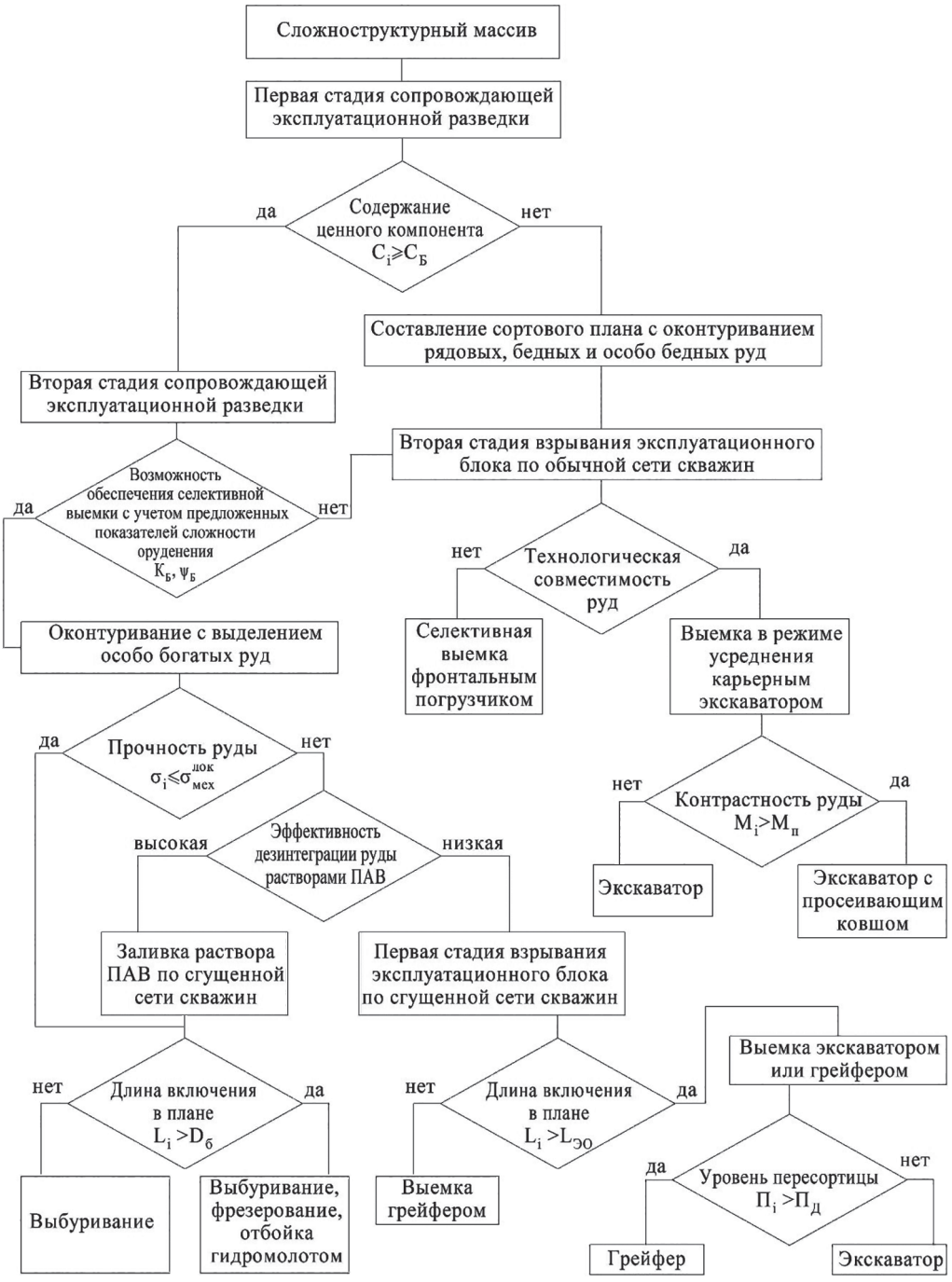


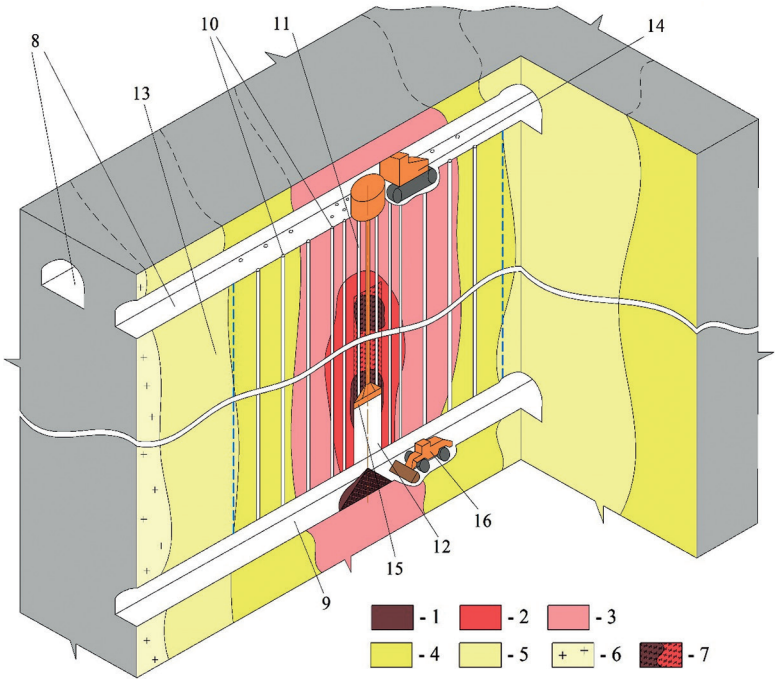
Рис. 5. Блок-схема алгоритма выбора последовательности открытой разработки сложноструктурных рудных тел штокверкового типа

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for selecting the sequence of open mining of complex structured ore bodies of the stockwork type

бедных руд. Проводится первая стадия взрывания участков богатых и особо богатых руд с использованием сгущенной сети скважин и получением качественно раздробленной рудной массы. В случае если прочность руд не превышает величины, позволяющей вести их локальную механическую выемку ($\sigma_i \leqslant \leqslant \sigma_{лок}^{мех}$), предпочтительно для уменьшения пересортицы осуществлять механическую выемку богатых и особо богатых руд путем отбойки, фрезерования, выбуривания или других известных способов. При этом в случае, если размеры включений особо богатых руд в плане не превышают диаметра расширителя буровой скважины $D_б$, предпочтительнее извлекать такие включения с применением выбуривания. Также для повышения эффективности механической выемки в некоторых случаях целесообразно проводить дезинтеграцию руд с применением различных способов [16, 17]. Исследования [18] по отработке контактных зон ценных руд показали, что их отбойка гидравлическим молотом, установленным на экскаваторе, в сравнении буровзрывной технологией позволяет в 2,5 — 3,0 раза снизить уровень эксплуатационных потерь, при этом при уменьшении прочности отбиваемых пород на 25 — 35% с 100 — 140 МПа до 80 — 100 МПа, производительность гидравлического молота возрастает в 1,5 — 2,0 раза.

С участием авторов были проведены исследования по разупрочнению руд раствором поверхностно-активных веществ (ПАВ), как в массиве, так и отдельных образцов, полученных из геологоразведочных кернов. Пропитка отдельных образцов руд (кварц-гидрослюдистых метасоматитов, березитов, хлоритов), имеющих прочность на одноосное сжатие 100…140 МПа и относящихся согласно классификации академика В.В. Ржевского к скальным породам средней трудности разрушения, обеспечила снижение их прочности на 21…42% [19]. Изменение прочности массива при его разупрочнении раствором ПАВ было выявлено путем бурения двух скважин на расстоянии 0,7 м одна от другой в березитах прочностью на сжатие 130…140 МПа в естественном состоянии, затем в одну из скважин заливался раствор ПАВ, после пропитки массива в течение 48 ч осуществлялось бурение третьей и четвертой скважин, находящихся симметрично на расстоянии 0,7 м от первых двух скважин, средняя скорость бурения в разупрочненном массиве увеличилась на 47%, что свидетельствует о существенном снижении прочности березитов.

Опережающая выемка взорванных особо богатых и богатых руд ведется гидравлическим экскаватором типа «обратная лопата», который переоснащается грейферным ковшом при ограниченных в плане размерах включений ($L_i < L_{эо}$). Также целесообразно его использование при выемке относительно крупных включений со сложным чередованием сортов руд для уменьшения пересортицы $П_д$. После второй стадии взрывания эксплуатационного блока с учетом технологической совместимости руд может вестись селективная выемка либо выемка в режиме усреднения с применением фронтального погрузчика или одноковшового карьерного экскаватора. При высокой контрастности особо бедной руды возможно выделение из нее кондиционных по содержанию порций или кусков, а также обогащенной рудной мелочи путем грохочения или выделения ее непосредственно в процессе выемки с применением экскаватора со специальным просеивающим ковшом [12]. Полученные хвосты сортировки (сепарации) могут быть направлены в отвал, использоваться как закладочный материал для подземного рудника или строительных целей, а концентрат и обогащенная ме-



1 – особо богатая руда; 2 – богатая руда; 3 – рядовая руда; 4 – бедная руда;
5 – особо бедная руда; 6 – пустые породы;
7 – разупрочненные раствором ПАВ богатые и особо богатые руды
(область использования механической выемки);
8 – буровые штреки; 9 – штрек откаточного горизонта; 10 – взрывные скважины;
11 – скважины для подачи раствора ПАВ; 12 – восстающий – компенсирующая камера;
13 – временный целик; 14 – специальная буровая установка;
15 – расширитель пионерной скважины; 16 – погрузочно-доставочная машина

Рис. 6. Схема подземной отработки сложноструктурного рудного тела штокверкового типа
Fig. 6. Scheme of underground mining of a complex-structured stockwork-type ore body

лочь могут быть отправлены на кучное выщелачивание совместно с бедной рудой.

Внедрение предлагаемой технологии при доработке оставшихся запасов на золоторудном месторождении Талатуй позволит увеличить сквозное извлечение металла на 4,5%, что составит порядка 720 кг золота при снижении себестоимости металла в сплаве на 5—7%, кроме того, существенно снизится отрицательная нагрузка на окружающую среду за счет сокращения объемов складирований измельченной дисперсной массы хвостов флотации.

Также опережающую выемку включений с высоким содержанием ценного компонента после их выявления и оконтуривания целесообразно осуществлять и при подземной разработке месторождений. Локальная механическая выемка может вестись с применением оборудования для проходки восстающих. Так, станок для бурения восстающих Амурец-1500 позволяет расширять пионерные скважины до диаметра 1,5 м, а буровая установка Atlas Copco Robbins 73RH — до 1,5—3,1 м [20]. Для увеличения производительности механической выемки предварительное разупрочнение массива

может осуществляться путем пропитки раствором ПАВ через сгущенную сеть скважин малого диаметра, сформированную при ведении второй стадии эксплуатационной разведки (рис. 6), в случае низкой эффективности подобной дезинтеграции возможно разупрочнение посредством взрывания «на встряхивание».

При проходке восстающего полученная особо богатая и богатая рудная масса ссыпается в штрек откаточного горизонта, откуда раздельно удаляется погрузочно-доставочной машиной.

В результате механической выемки руд образуется компенсирующая камера для последующей первичной стадии взрывания богатых руд по сгущенной сети скважин, что обеспечивает качественное дробление рудной массы. Вторая стадия взрывания эксплуатационного блока необходима для рыхления рядовых и бедных руд и осуществляется с использованием обычной сети скважин. Богатые и рядовые руды доставляются на поверхность для переработки на обогатительной фабрике. Взорванные бедные руды и окомкованные хвосты переработки (или кеки) особо богатых руд, размещенные в выработанном пространстве, выщелачиваются после их естественного окисления. На завершающем этапе осуществляется взрывная подготовка и выщелачивание металла из оставленных целиков.

В настоящее время развитие подземного выщелачивания из особо бедных руд сдерживает отсутствие эффективных решений проблемы качественного дробления при взрывной подготовке, а также необходимость интенсивного окисления сульфидных составляющих. В Институте горного дела ДВО РАН разработаны методы взрывной подготовки с инъекционной пропиткой дезинтегрируемой руды высокоактивными окислителями, что позволяет решать указанную проблему [21].

Заключение

В статье обоснована система показателей, позволяющая оценивать сложность внутренней структуры оруденения, на основании которой проводится оконтуривание выемочных блоков с учетом физико-технических и качественных параметров руд, а также технических характеристик выемочного оборудования. Предлагается метод оконтуривания выемочного блока с выделением в нем включений особо богатых руд и уточнением их границ посредством проведения сопровождающей стадии эксплуатационной разведки в два этапа с локальным сгущением сети пробоотборных выработок после выявления обогащенных зон.

Опережающая локальная выемка особо богатых руд позволит снизить изменчивость содержаний при последующей выемке и усреднении основного объема руд и стабилизирует качество рудной массы, направляемой на обогатительную фабрику. Значительный уровень содержания ценного компонента в особо богатых рудах позволяет достигать относительно низкой себестоимости конечного продукта при использовании специальных методов, обеспечивающих более высокое сквозное извлечение, при этом возможно получать хвосты переработки (или кеки) с содержанием металла, достаточным для их рентабельной вторичной переработки методами физико-химических геотехнологий.

Повышение эффективности локальной механической выемки может быть достигнуто за счет применения раствора ПАВ, подаваемого в соответствующий участок блока через скважины и позволяющего снизить прочность руд на сжатие на 20…40% и более.

В переработку могут быть также вовлечены обогащенные ценным компонентом мелкие фракции особо бедных руд, которые после отделения от основной рудной массы направляются на куч-

ное выщелачивание совместно с бедными рудами. Внедрение предлагаемых технологических решений при разработке сложноструктурных месторождений позволит увеличить сквозное извлечение металла на 4…6% в сравнении с традиционными технологиями переработки руд. В связи с сокращением объемов складирований измельченной дисперсной массы хвостов флотации существенно снизится отрицательная нагрузка на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трубецкой К. Н.*, *Каплунов Д. Р.*, *Викторов С. Д.*, *Рыльникова М. В.*, *Радченко Д. Н.* Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 12. — С. 5—12.

2. *Каплунов Д. Р.*, *Рыльникова М. В.* Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 24—39.

3. *Хакулов В. А.*, *Шаповалов В. А.*, *Игнатов М. В.* Исследование и совершенствование текущего управления ритмичностью работы интеллектуального комплекса экскаватор — автосамосвал в смежных экскаваторных забоях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S29. — С. 18—33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-29-18-33.

4. *Шестаков В. А.*, *Шаляпин В. Н.*, *Литовченко Т. В.* Теория оптимизации и совершенствования подземной разработки сложных рудных залежей. — Новочеркасск, Изд. Набла, 2005. — 391 с.

5. *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.

6. *Wu J.*, *Ahn J.*, *Lee J.* Comparative leaching study on conichalcite and chalcopyrite 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.

7. *Трубецкой К. Н.*, *Шапарь А. Г.* Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. — М.: Недра, 1993. — 272 с.

8. *Afum B. O.*, *Ben-Awuah E.*, *Askari-Nasab H.* A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit — underground mining options and transitions // International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2019, vol. 34, no. 10, pp. 700—724. DOI: 10.1080/ 17480930.2019.1701968.

9. *Голик В. И.*, *Разоренов Ю. И.*, *Бригида В. С.*, *Бурдзиева О. Г.* Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 6. — С. 175—183. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2687.

10. *Рассказов И. Ю.*, *Секисов А. Г.*, *Рассказова А. В.* Подземное выщелачивание молибдена и урана с использованием перкарбонатных и хлоридно-гипохлоритных растворов // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 623—631. DOI: 10.31897/PMI. 2022.60.

11. *Robertson S. W.*, *Van Staden P. J.*, *Cherkaev A.*, *Petersen J.* Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching // Hydrometallurgy. 2022, vol. 208, pp. 1—17. DOI: 10.10165/J.HYDROMET.2021.105811.

12. *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, pp. 978—985. DOI: 10.1134/S1062739121060107.

13. *Юматов Б. П.*, *Секисов Г. В.*, *Буянов М. И.* Нормирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах. — М.: Недра, 1987. — 183 с.

14. *Батугин С. А.*, *Черный Е. Д.* Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. — Новосибирск: Наука, 1998. — 344 с.

15. *LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R.* An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty // Minerals. 2021, vol. 11, no. 2, p. 172. DOI: 10.3390/min11020172.

16. *Панишев С. В.*, *Хосоев Д. В.*, *Матвеев А. И.* Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ // Горная промышленность. — 2021. — № 1. — С. 98—104. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-98-104.

17. *Kahraman S., Canpolat A., Fener M.* The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 129, article 104303. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104303.

18. *Лигоцкий Д. Н.* Отработка контактных зон с использованием гидромолотов для снижения уровня потерь полезного ископаемого // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S1-4. — С. 7—13.

19. *Чебан А. Ю.*, *Секисов А. Г.*, *Рассказов М. И.*, *Цой Д. И.*, *Терешкин А. А.* Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительного физико-химического разупрочнения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 9. — С. 29—41. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_29.

20. *Рогизный В. Ф.*, *Хромов В. М.* Селективная выемка маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования // Рациональное освоение недр. — 2019. — № 2-3. — С. 88—98. DOI: 10.26121/RON.2019.12.32.013.

21. *Секисов А. Г.*, *Шевченко Ю. С.*, *Лавров А. Ю.* Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: Сборник научных статей. — Новосибирск, 2012. — С. 125—132. ГИАБ

REFERENCES

1. Trubetskoi K. N., Kaplunov D. R., Victorov S. D., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 12, pp. 5—12. [In Russ].

2. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. Development of scientific and methodological founda tions for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological structure. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 24—39. [In Russ].

3. Khakulov V. A., Shapovalov V. A., Ignatov M. V. Research and improvement of the current management of the rhythmicity work the intellectual complex excavator — dump truck in the adjacent open-pit excavators faces. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S29, pp. 18—33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-8-29-18-33.

4. Shestakov V. A., Shalyapin V. N., Litovchenko T. V. *Teoriya optimizatsii i sovershenstvovaniya podzemnoy razrabotki slozhnykh rudnykh zalezhey* [Theory of optimization and improvement of underground mining of complex ore deposits], Novocherkassk, Nabla, 2005, 391 p.

5. Lomonosov G. G., Turtigina N. A. Influence of coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the benefication indication. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 104—107. [In Russ].

6. Wu J., Ahn J., Lee J. Comparative leaching study on conichalcite and chalcopyrite 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.

7. Trubetskoy K. N., Shapar' A. G. *Malootkhodnye i resursosberegayushchie tekhnologii pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Low-waste and resource-saving technologies in open-pit mining], Moscow, Nedra, 1993, 272 p.

8. Afum B. O., Ben-Awuah E., Askari-Nasab H. A mixed integer linear programming framework for optimising the extraction strategy of open pit — underground mining options and transitions. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2019, vol. 34, no. 10, pp. 700—724. DOI: 10.1080/ 17480930.2019.1701968.

9. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Brigida V. S., Burdzieva O. G. Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 6, pp. 175—183. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2687.

10. Rasskazov I. Yu., Sekisov A. G., Rasskazova A. V. In-situ leaching of molybdenum and uranium by percarbonate and chloride-hypochlorite solutions. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 623—631. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.60.

11. Robertson S. W., Van Staden P. J., Cherkaev A., Petersen J. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022, vol. 208, pp. 1—17. DOI: 10.10165/J.HYDROMET.2021.105811.

12. 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, pp. 978—985. DOI: 10.1134/S1062739121060107.

13. Yumatov B. P., Sekisov G. V., Buyanov M. I. *Normirovanie i planirovanie polnoty i kachestva vyemki rudy na kar'erakh* [Rationing and planning of the completeness and quality of ore mining in open pits], Moscow, Nedra, 1987, 183 p.

14. Batugin S. A., Chernyy E. D. *Teoreticheskie osnovy oprobovaniya i otsenki zapasov mestorozhdeniy* [Theoretical foundations of sampling and evaluation of reserves of deposits], Novosibirsk, Nauka, 1998, 344 p.

15. LaRoche-Boisvert M., Dimitrakopoulos R. An application of simultaneous stochastic optimization at a large open-pit gold mining complex under supply uncertainty. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 2, p. 172. DOI: 10.3390/min11020172.

16. Panishev S. V., Khosoev D. V., Matveev A. I. Enhancing efficiency of overburden removal and coal mining at Elginsky coal deposit in Yakutia by their softening with surfactants. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 1, pp. 98—104. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-1-98-104.

17. Kahraman S., Canpolat A., Fener M. The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 129, article 104303. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104303.

18. Ligotsky D. N. Development of contact zones with the use of hydrohammer in order to cut mineral losses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S1-4, pp. 7—13. [In Russ].

19. Cheban A. Yu., Sekisov A. G., Rasskazov M. I., Tsoi D. I., Tereshkin A. A. Efficiency upgrading in selective mining of high-grade ore by means of preliminary physico-chemical softening. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 9, pp. 29—41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_29.

20. Rogiznyy V. F., Khromov V. M. Selective mining of thin orebodies with use compact self-propelled underground equipment. *Racional'noe osvoenie nedr*. 2019, no. 2-3, pp. 88—98. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2019.12.32.013.

21. Sekisov A. G., Shevchenko Yu. S., Lavrov A. Yu. Explosive injection preparation of ores for leaching. *Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoy geosredy*: Sbornik nauchnykh statey [Fundamental problems of formation of technogenic geomedia: Collection of scientific articles], Novosibirsk, 2012, pp. 125—132.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рассказов Игорь Юрьевич[1] — член-корреспондент РАН,
д-р техн. наук, директор,
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2215-6642,
Секисов Артур Геннадьевич[2] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sekisovag@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,
Чебан Антон Юрьевич[2] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: chebanay@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2707-626X
[1] Хабаровский Федеральный
исследовательский центр ДВО РАН,
[2] Институт горного дела ДВО РАН.
Для контактов: Чебан А.Ю., e-mail: chebanay@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.Yu. Rasskazov[1], Corresponding Member
of Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Director,
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2215-6642,
A.G. Sekisov[2], Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher,
e-mail: sekisovag@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,
A.Yu. Cheban[2], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher,
e-mail: chebanay@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,
[1] Khabarovsk Federal Research Centre,
Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences, Khabarovsk, Russia.
[2] Institute of Mining of Far East Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: A.Yu. Cheban, e-mail: chebanay@mail.ru.

Получена редакцией 15.01.2023; получена после рецензии 28.02.2023; принята к печати 10.03.2023.
Received by the editors 15.01.2023; received after the review 28.02.2023; accepted for printing 10.03.2023.