

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13



КРИСТАЛЛОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Секисов А.Г., Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Извлечение из недр кимберлитовых руд должно вестись с максимальным сохранением природного качества минерального сырья. Стоимость содержащихся в руде кристаллов зависит, прежде всего, от крупности отдельных алмазов и их дефектности. Повысить сохранность добываемого кристаллосырья возможно за счет отказа от взрывного рыхления и перехода на механический способ выемки руды, в том числе с ее предварительным физико-химическим разупрочнением. При этом наибольший эффект от механической выемки достигается при разработке руд высокой ценности. В настоящее время в связи с развитием горного оборудования основная часть массива кимберлитов может быть отработана с применением механических средств выемки циклического или непрерывного действия. **Цель работы.** Научное обоснование усовершенствованной кристаллосберегающей технологии разработки месторождений на основе гибкого комбинирования технологических процессов подготовки к выемке с дифференцированием кимберлитовых руд по комплексу показателей, учитывающих их ценность и прочностные параметры. **Результат.** В статье предлагается технология освоения сложноструктурных рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки кимберлитов к выемке и собственно выемки. Первоначально путем бурения сети скважин и поинтервального опробования минеральной массы производится дифференциация участков рудного массива на зоны с последующим локальным сгущением сети скважин в зоне руд высокой ценности. При выявлении отдельных интервалов руд аномально высокой ценности производится ее извлечение путем выбуривания керна большого диаметра с дальнейшей переработкой руд щадящими методами. Подготовка зон руд высокой ценности к выемке механическим способом производится посредством разупрочнения за счет пропитки массива активной жидкостно-газовой смесью, полученной путем электрохимической обработки природного рассола, с последующим извлечением ослабленных руд одноковшовым экскаватором. Зоны руд рядовой ценности и зона руд низкой ценности и невысокой прочности отрабатываются с применением машины послойного фрезерования, обеспечивающей возможность получения мелкокусковой или среднекусковой рудной массы, последующая селективная выемка разрыхленной руды проводится погрузчиками. Зона руд низкой ценности и относительно высокой прочности подготавливается к выемке посредством взрывоинъекционной подготовки с применением кумулятивных зарядов специальной конструкции. Данная зона оконтуривается посредством буферного слоя, формируемого путем бурения технологических скважин и пропитки через них массива, для уменьшения отрицательного действия взрыва на смежные рудные зоны. Взорванная рудная масса извлекается из навала погрузчиками.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, кристаллическое сырье, дифференциация руд, разупрочнение, механическая выемка, экскаватор, погрузчик.

© Секисов А.Г., Чебан А.Ю., 2021

Для цитирования

Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Кристаллосберегающая технология открытой разработки сложноструктурных кимберлитовых месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13>



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

CRYSTAL-SAVING TECHNOLOGY OF OPEN MINING OF COMPLEX STRUCTURE KIMBERLITE DEPOSITS

Sekisov A.G., Cheban A.Yu.

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

Abstract. Relevance and purpose of the study. Extraction of kimberlite ores should be carried out with the maximum preservation of the natural quality of mineral raw materials. The cost of crystals contained in the ore depends primarily on the size of individual diamonds and their defectiveness. It is possible to increase the safety of the extracted crystal raw materials by abandoning explosive loosening and switching to a mechanical method of ore extraction, including its preliminary physicochemical softening. At the same time, the greatest effect from such mechanical extraction is achieved when mining high-value ores. Currently, in connection with the development of mining equipment, a main part of the kimberlite massif can be mined using mechanical means of extraction of a cyclic or continuous action. **Objective.** The research is aimed at providing a scientific rationale for the improved crystal-saving technology of field development based on a flexible combination of technological processes of preparation for mining with the differentiation of kimberlite ores by a set of indicators, taking into account their value and strength parameters. **Result.** The paper proposes a technology for the development of complex structure diamond ore deposits with the use of selective preparation of kimberlites for excavation and the actual excavation. Initially, by drilling a network of wells and interval sampling of the mineral mass, sections of the ore massif are differentiated into zones, followed by local thickening of the network of wells in the zone of high-value ores. When individual intervals of ores of an anomalously high value are identified, they are extracted by drilling out a large diameter core with further processing of ores using improved methods. High-value ore zones are prepared for extraction by a mechanical method by softening due to the impregnation of the massif with an active liquid-gas mixture produced by electrochemical processing of the natural brine followed by the extraction of weakened ores with a single-bucket excavator. Zones of common value ores and a zone of ores of a low value and low strength are mined using a layer-by-layer milling machine, which makes it possible to obtain small lump or medium lump ore mass, followed by selective mining of loosened ore by loaders. The zone of ores of a low value and relatively high strength is prepared for extraction by means of blast-injection preparation using shaped charges of a special design. This zone is delineated by means of a buffer layer formed by drilling technological wells and impregnating the massif through them to reduce the negative effect of the explosion on adjacent ore zones. The exploded ore mass is removed from the heap by loaders.

Keywords: complex structure deposits, crystal raw materials, ore differentiation, softening, mechanical excavation, excavator, loader.

For citation

Sekisov A.G., Cheban A.Yu. Crystal-Saving Technology of Open Mining of Complex Structure Kimberlite Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 5–13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13>

Введение

Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья должна вестись с применением технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения с максимальным сохранением природного качества минерального сырья в процессе подготовки его к выемке и собственно выемки [1, 2]. Особенно важно обеспечить сохранение природного качества сырья при разработке месторождений кимберлитов. Стоимость содержащихся в руде кристаллов зависит прежде всего от крупности отдельных алмазов и их дефектности, то есть наличия трещин, сколов, посторонних включений, в зависимости от которых алмазы подразделяются на ювелирные, оо-

лювельрные и технические. Так, согласно [3] технические алмазы массой 0,0256–0,116 карат оценивались в 5,4–14 долл./кар, а массой 0,117–0,302 карат – в 23–34 долл./кар, ювелирные алмазы массой 0,45–0,89 карат оценивались в 46–73 долл./кар, а массой 0,90–1,79 карат и 1,80–10,79 карат, соответственно в 126 и 388 долл./кар. Таким образом, при равном содержании по общему весу алмазов в руде ее стоимость может различаться в десятки раз.

В настоящее время основной объем алмазов добывается открытым способом, при этом наибольшее распространение получила традиционная технология с применением буровзрывных работ, последующей выемкой горной массы экскаваторами и транспортировкой автосамосвалами. Взрывное рыхление кимберлитовых руд

приводит к повреждениям кристаллов, что значительно снижает их качество и рыночную стоимость. Исследования, проводившиеся в АК «АЛРОСА», показали, что при взрывании кимберлитов по традиционной технологии степень разрушения алмазов может достигать 45% [4], также АК «АЛРОСА» отмечаются многочисленные технологические повреждения кристаллов алмазов. Например, из 177 ювелирных алмазов массой более 50 каратов 28,2% кристаллов носят признаки повреждений. Исследования поверхности и формы многих именных кристаллов гигантов массой 240–320 каратов показывают, что ранее они являлись частями более крупных алмазов массой около 1000 каратов и более. В работе [4] представлены данные по степени разрушения кристаллов алмазов в зависимости от их крупности на рудниках компании «Де Бирс», согласно которым при взрывном рыхлении доля разрушенных алмазов составляет 14,3, 28,6, 42,9, 57,2, 71,5, 85,8, 100% в размерных группах кристаллов соответственно 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 см. Повысить сохранность добываемого кристаллосырья возможно за счет отказа от взрывного рыхления. Переход на механический способ выемки руды обеспечивает увеличение стоимости получаемой продукции на 10–14% за счет роста выхода крупных кристаллов алмазов [5, 6]. При этом наибольший эффект от механической выемки достигается при разработке руд высокой ценности.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Развитие горного оборудования дает возможность вести безвзрывную разработку все более прочных горных пород [7–9]. В настоящее время основная часть массива кимберлитовых руд может быть отработана с применением механических средств выемки, таких как гидравлические одноковшовые экскаваторы, роторные экскаваторы, бульдозерно-рыхлительные агрегаты, комбайны различных конструкций, буровые агрегаты и др. [10–14]. Так, на карьере трубки «Удачная» впервые в мире в условиях Крайнего Севера на нижних горизонтах глубокого карьера были проведены испытания роторного экскаватора К-650 [10]. Испытания выявили принципиальную возможность экскавации кимберлитов крепостью до 8 единиц роторным экскаватором с повышенным усилием копания, при последующей переработке руды достигнуто увеличение сохранности алмазов и снижение энергоемкости подготовки руды в сравнении с традиционной технологией на 15–20%. На карьере открыто-подземного рудника Koala (США, Аляска) ве-

дется разработка кимберлита двумя комбайнами Wirtgen 2200SM-TT в арктическом исполнении, позволяющим им работать при температуре до -40°C [12]. Переход на послойную выемку позволил вести открытые работы вблизи подземных выработок. Для разработки ценных руд с высоким содержанием алмазов на подземных рудниках «АЛРОСА» впервые в мировой практике разработана и успешно внедрена технология с комбайновой выемкой руды (комбайны АМ-75 и АМ-105) и закладкой выработанного пространства [13]. Наибольший эффект комбайновая выемка обеспечила при отработке высокоценных руд, хотя при этом себестоимость добычи возросла на 20–25% по сравнению с буровзрывной технологией.

На трубке им. Карпинского-1 АО «Севералмаз» проводилась выемка кимберлитовых руд путем бурения скважины большого диаметра (4 м), технология доказала высокую степень сохранности алмазов и полноту их извлечения из недр [14]. Известна технология выбуривания руды вертикальными цилиндрическими выработками, заключающаяся в бурении пилотной скважины на высоту этажа и последующим разбуриванием скважины обратным ходом посредством расширителя [14]. Институтом горного дела Севера СО РАН предложен буровой способ разработки кимберлитов, который предусматривает разбивку рудного поля на прилегающие друг к другу правильные шестиугольники со стороны, равной диаметру буримой скважины, выбуривание и подрезание керна кимберлита большого диаметра, подъем керна стреловым самоходным краном с последующей закладкой выработанного пространства [10]. Недостатками буровых способов выемки являются относительно низкая производительность и высокая себестоимость работ.

Перспективным направлением развития технологий безвзрывной выемки является применение для разупрочнения горных массивов поверхностно-активных веществ (ПАВ) и природных рассолов [15–17]. Разупрочнение кимберлитов посредством воздействия на них растворами ПАВ приводит к снижению прочности на одноосное сжатие на 50% [15]. Способ разработки кимберлитовых трубок [16] предполагает дезинтеграцию массива мерзлых пород с применением высоконапорного гидравлического воздействия с последующей выемкой кимберлитов экскаватором с активным рабочим органом. Недостатками подобных способов являются многооперационность, относительно высокая себестоимость и низкая производительность работ, в связи с чем, валовая выемка кимберлитовых руд с их приме-

нением нецелесообразна. В работе [17] предлагается в зонах месторождения, содержащих руды особо высокой ценности с повышенным содержанием ювелирных алмазов, разупрочнение массива производить через скважины посредством электрогидравлического устройства, обеспечивающего инъецирование активной жидкостно-газовой смеси природного рассола в массив и последующую выемку ослабленной руды посредством разбуривания скважин.

Увеличить эффективность разработки коренных месторождений кимберлитов возможно за счет использования технологий и технических средств, учитывающих природные свойства отдельных участков месторождения, позволяющих значительно снизить потери качества сырья при его выемке и уменьшить затраты на разработку [6]. Существенно различающиеся прочностные характеристики и ценность руд месторождений и их отдельных участков (природно-технологических зон) обуславливают необходимость применения методического подхода к дифференцированному выбору технологий разработки [18]. При этом максимальная эффективность разработки будет обеспечиваться при наилучшей совместимости технических характеристик оборудования с природными условиями зоны, обеспечивающими необходимую производительность и сохранность кристаллосырья при приемлемой себестоимости и энергоемкости процессов.

В способе селективной разработки [6] предлагается вести оконтуривание кимберлитовых руд по физико-механическим свойствам и ценности с выделением зон по пределу прочности на сжатие (свыше 60, 40–60, 30–40 и менее 30 МПа) и по ценности руды (высокой, средней и низкой ценности). Технологические зоны руд низкой ценности предлагается отрабатывать с использованием буровзрывной подготовки и последующей выемки одноковшовым экскаватором. Руды высокой ценности с пределом прочности на сжатие до 40 МПа предлагается рыхлить бульдозерно-рыхлительным агрегатом с последующим перемещением руды бульдозером в разрезной котлован с высокоминерализованным рассолом для ее замачивания и разупрочнения [6]. Рыхление и отгрузка руд высокой ценности прочностью 40–60 МПа ведется посредством роторного экскаватора специального исполнения. В этой же работе для открытой разработки трубки «Удачная» было предложено разделение рабочих горизонтов на три природно-технологические зоны. Одну из зон рекомендовалось отрабатывать карьерным комбайном сплошного фрезерования, вторую зону – гидрав-

лическим экскаватором без предварительного рыхления массива, породы третьей зоны, подготовленные к выемке взрывным рыхлением с последующим разупрочнением рассолами, извлекать с применением канатного экскаватора.

Несмотря на обеспечение большей сохранности кристаллов при механической выемке в сравнении с взрывным рыхлением очевидно, что механическое разрушение также может вызывать разрушение кристаллов алмазов.

Целью исследования является создание усовершенствованной кристаллосберегающей технологии разработки месторождений на основе комбинирования современных технических и технологических решений.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН разработан способ освоения сложноструктурных рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке. Первоначально путем бурения сети скважин производится дифференциация участков рудного массива на зоны в зависимости от ценности и прочности руд. Предлагается осуществлять выделение этих зон по комплексному критерию, включающему пороговые значения двух параметров:

$$\begin{cases} f_i > f_{nj} \\ d_i \geq d_m \end{cases} \quad (1)$$

при соблюдении ограничивающих условий:

$$C_c > C_{\min}; \quad (2)$$

$$\sigma C_{dmi} \geq \sigma \bar{C}_{dm}, \quad (3)$$

где f_i – коэффициент прочности массива по Протодьяконову в i -й зоне; f_{nj} – допустимый предел прочности массива для использования j -й технологии; d_i – средний размер кристалла алмаза в i -й зоне; d_m – размер кристалла ювелирного класса; C_c – общее содержание алмазов, карат/т; C_{\min} – минимально допустимое содержание по экономическим условиям; σC_{dmi} , $\sigma \bar{C}_{dm}$ – содержание ювелирных алмазов в i -й зоне текущее и предельное.

В целом в соответствии с вышеуказанными показателями выделены: зоны с рудами низкой ценности и невысокой прочности 1, зоны с рудами низкой ценности и относительно высокой прочности 2, зоны с рудами рядовой ценности и невысокой прочности 3, зоны с рудами рядовой ценности и относительно высокой прочности 4; зоны с рудами высокой ценности и невысокой

прочности 5, зоны с рудами высокой ценности и относительно высокой прочности 6, как частный случай в независимости от прочности могут быть выделены участки руд аномально высокой ценности 7 (**рис. 1**).

При вскрытии скважинами руд высокой ценности производится локальное сгущение сети скважин с оконтуриванием зоны руд высокой ценности. В случае выявления в скважинах зоны руд высокой ценности отдельных интервалов руд аномально высокой ценности производится уточнение местоположения участков руд аномально высокой ценности путем опробования бурового материала, полученного при сегментном нарезании круговых щелей в околоскважинном пространстве посредством устройства для подрезания керна, оснащенного элементами подачи и отсоса аэросмеси [19]. При этом проходка щелей на удалении порядка 1,0–1,5 м от стенки скважин позволяет, анализируя долю пиропов и магнийсодержащих оливинов с примесью хрома, прогнозировать контуры участков руд аномально высокой ценности 7, т.е. имеющие повышенную вероятность встречи относительно крупных алмазов ювелирного класса.

Подготовка зон руд высокой ценности 5, 6 к выемке механическим способом производится посредством щадящего ослабления (разупрочнения) путем пропитки массива с помощью инъектирования активной жидкостно-газовой смеси, полученной электрохимической обработкой природного хлоридно-кальциевого рассола, через технологические скважины 8 с применением электрогидравлических устройств, установленных на агрегате 9 (**см. рис. 1**). При этом в зоне с рудами высокой ценности и невысокой прочности 5 технологические скважины 8 бурятся одна от другой на большем расстоянии, чем в зоне с рудами высокой ценности и относительно высокой прочности 6. Расстояние между технологическими скважинами 8 подбирается исходя из возможности обеспечения пропитки и ослабления всего объема руд зон. После разупрочнения природным рассолом производится локальное выбуривание участка руд аномально высокой ценности 7 в виде керна большого диаметра буровой установкой 10. После извлечения керна отправляется на специальную переработку с щадящей дезинтеграцией и ручной разборкой материала. Предварительно разупрочненные руды высокой ценности зон 5, 6 извлекаются из массива с применением гидравлического экскаватора 11, который также может быть оснащен сменным рыхлительным оборудованием для дополнительной подготовки руд относительно высокой прочности к выемке. Извлеченная рудная масса транс-

портируется к месту обогащения автосамосвалами 12. Зоны руд рядовой ценности 3, 4 и зона руд низкой ценности и невысокой прочности 1 отрабатываются с применением машины послойного фрезерования 13, обеспечивающей возможность получения мелкокусковой 14 или среднекусковой 15 рудной массы, последующая селективная выемка разрыхленной руды проводится погрузчиками 16 (**см. рис. 1**).

Для снижения энергоемкости процесса рыхления и повышения сохранности кристаллов алмазов при выемке руд различной прочности предлагается применение машины послойного фрезерования 1, оснащенной усовершенствованным рабочим органом 2 с изменяемой схемой расстановки резцов 3, 4 (**рис. 2**).

Удлиненные резцы 3 и укороченные резцы 4 установлены на поворотных ступицах 5, взаимодействующих с приводными валами 6, расположенными в корпусе рабочего органа 2. При разработке руд невысокой прочности 7 с целью снижения энергоемкости рыхления и уменьшения повреждений кристаллов, содержащихся в руде, в рабочее положение поворачиваются удлиненные резцы 3, расставленные по разреженной схеме с большим шагом 8. При отработке кимберлитовых руд относительно высокой прочности 9 удлиненные резцы 3 на поворотных ступицах 5 посредством приводных валов 6 поворачиваются внутрь корпуса и в работу вступают укороченные резцы 4, расставленные по схеме с вдвое уменьшенным шагом расстановки 10. Таким образом, при рыхлении кимберлитов невысокой прочности 7 удлиненными резцами 3 получается среднекусковая рудная масса 11, а при рыхлении кимберлитов относительно высокой прочности 9 укороченными часто расставленными резцами 4 – мелкокусковая рудная масса 12 (**см. рис. 2**).

Зона руд низкой ценности и относительно высокой прочности 2 отделяется от остальных типов руд посредством буферного слоя 17 (**см. рис. 1**), формируемого из руд зоны 2 по ее границам за счет бурения технологических скважин 8 и пропитки через них массива природным хлоридно-кальциевым рассолом с применением электрогидравлических устройств, установленных на агрегате 9. В зоне 2 буровой установкой 10 производится бурение взрывных скважин 18, в которых размещаются кумулятивные заряды ВВ специальной конструкции 19. Наличие буферного слоя 17 уменьшает отрицательное действие взрыва на смежные рудные зоны, предназначенные для механической выемки. Взорванная рудная масса извлекается из навала погрузчиками.

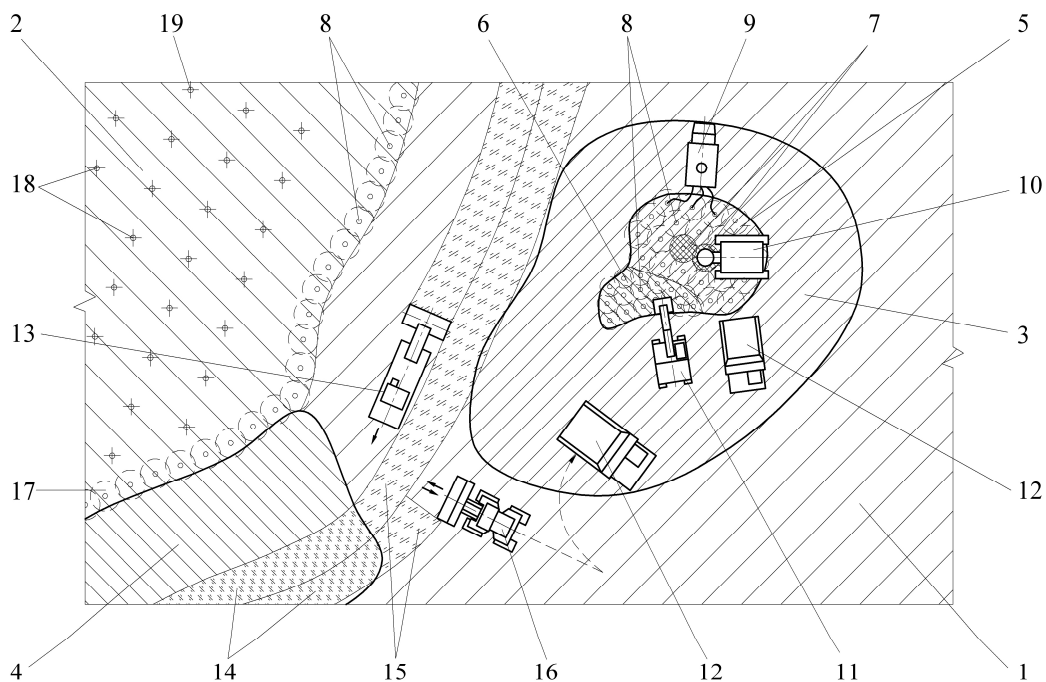


Рис. 1. Схема комбинированной разработки сложноструктурного месторождения кимберлитов
Fig. 1. Combined development of a complex structure deposit of kimberlites

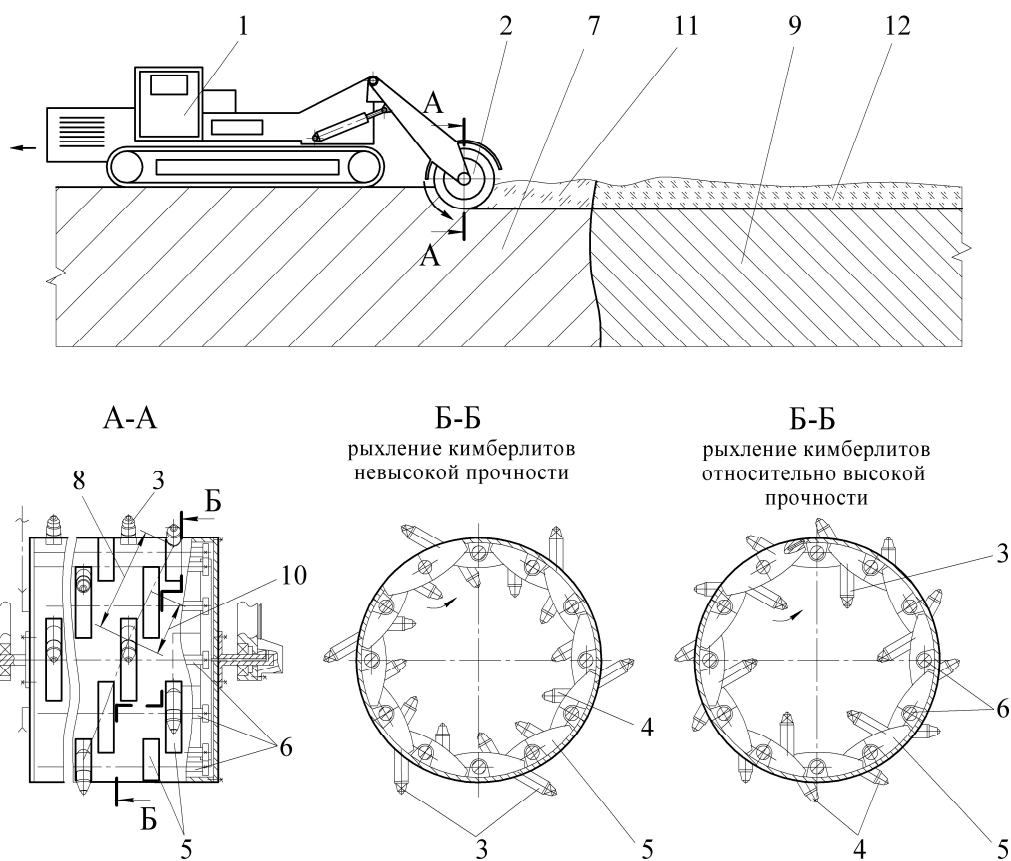


Рис. 2. Схема выемки кимберлитовой руды машиной послойного фрезерования с усовершенствованным рабочим органом с изменяемой расстановкой резцов
Fig. 2. Kimberlite ore excavation using the machine for layer-by-layer milling with a variable arrangement of cutters on the working body

Кумулятивные заряды специальной конструкции для обеспечения щадящего взрывного воздействия на массив включают внутреннюю 1 и наружную 2 полости с природным рассолом, кумулятивные полости 3, обеспечивающие формирование направленных потоков газопаровой смеси, а также имеют коаксиальное размещение взрывчатых веществ 4 (рис. 3).

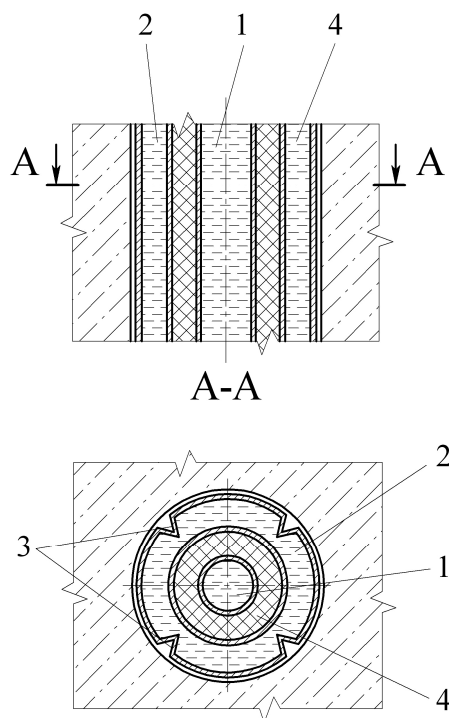


Рис. 3. Схема кумулятивного заряда ВВ специальной конструкции, снаряженного трубками с рассолом для щадящего взрывания массива
Fig. 3. Shaped charges of a special design equipped with tubes with brine for damage minimizing blasting of the massif

При взрыве заряда ВВ 4 образуются взрывные газы, которые под давлением разрушают оболочки внутренней и наружной полостей с природным рассолом, в результате чего образуется газопаровая смесь, а давление в скважине нарастает плавно в сравнении с зарядом ВВ обычной конструкции. Плоские поверхности кумулятивных полостей 3, как известно, обеспечивают высокое качество дробления руд [20].

Выводы

Предлагаемые в статье технико-технологические решения направлены на повышение сохранности природного качества кристаллосырья при его добыче с применением взрывного и механического рыхления массива. Предварительная дифференциация массива кимберлитов с

окопированием зон руд высокой ценности и участков руд аномально высокой ценности позволяет локально использовать технологии, обеспечивающие наибольшую сохранность кристаллов, в частности выбуривание керна большого диаметра и пропитки массива под давлением природными рассолами через технологические скважины. Руды средней ценности предлагается рыхлить механическим способом, при этом в зависимости от их прочности варьирует схема расстановки резцов на рабочем органе фрезерной машины. Также обеспечивается повышение сохранности кристаллов, содержащихся в рудах низкой ценности за счет обеспечения щадящего взрывного рыхления с применением кумулятивных зарядов специальной конструкции. Применение дифференцированных подходов к разработке сложноструктурных месторождений кристаллосырья позволит обеспечить выполнение принципа ресурсосбережения и повысить рентабельность горного производства.

Список литературы

1. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Викторов С.Д., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 12. С. 5–12.
2. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
3. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Алмазы. Москва: МПР, 2007. 37 с.
4. Власов В.М., Андросов А.Д., Бескрованов В.В. Уровень современных кристаллосберегающих технологий добычи алмаза на Севере // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 5–6.
5. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Иван Ф.Б. Состояние и перспективы развития горнообогатительных технологий на алмазодобывающих предприятиях АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горная промышленность. 2017. № 2. С. 6–13.
6. Анистратов Ю.И., Борщ-Компониц Л.В., Анистратов К.Ю. Эффективность открытой разработки месторождений по природно-технологическим зонам // Горный журнал. 1990. № 8. С. 19–24.
7. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 18–23.
8. Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е. Особенности управления качеством рудной массы при разработке сложноструктурных месторождений апатитовых руд

- с применением комбайновой выемки // Рациональное освоение недр. 2019. № 2–3. С. 80–86.
9. Palei S., Karmakar N., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no 9, pp. 393–396.
 10. Ермаков С.А., Бураков А.М. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений криолитозоны // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 96–104.
 11. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods: The Underlying Concepts. – Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.
 12. Пихлер М., Дикк Ф., Панкевич Ю.Б. Комбайны Wirtgen Surface Miner на добыче алмазов на Аляске // Горная промышленность. 2009. № 4. С. 14–15.
 13. Монтянова А.Н. К вопросу автоматизации технологии закладочных работ при комбайновой отбойке руды коренных алмазных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 2. С. 343–353.
 14. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров / В.Л. Яковлев, П.И. Тарасов, В.О. Фурин, И.В. Зырянов. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 268 с.
 15. 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.
 16. Пат. 2158827 Российская Федерация, МПК E21C 41/26. Способ разработки кимберлитовых трубок / А.Д. Андросов, В.М. Власов, С.П. Альков, А.Н. Акишев; заявитель и патентообладатель Якутский государственный университет им. М.К. Аммосова. № 97115793/03; заявл. 23.09.1997; опубл. 10.11.2000.
 17. Пат. 2664283 Российская Федерация, МПК E21C 41/22, E21C 37/06, E21C 37/18. Способ разработки рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке / И.Ю. Рассказов, Г.В. Секисов, А.Г. Секисов, А.Ю. Чебан, Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Институт горного дела ДВО РАН». № 2017136239; заявл. 12.10.2017; опубл. 16.08.2018.
 18. Геотехнологии извлечения мелкого и тонкого золота из техногенного минерального сырья Забайкальского края / Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Шевченко Ю.С., Манзырев Д.В. // Вестник Забайкальского университета. 2012. № 1. С. 34–41.
 19. Егоров Д.Г. Преимущества выбуривания цилиндрических изделий из камня на карьерах и способы их отделения от массива горных пород // Записки горного института. 2006. Т. 167. С. 10–12.
 20. Совершенствование скважинной отбойки / А.В. Будько, В.М. Закалинский, С.К. Рубцов, А.А. Блинов. М.: Недра, 1981. 199 с.

References

1. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2014, no. 12, pp. 5–12. (In Russ.)
2. 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. (In Russ.)
3. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznnykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Almazы*. [Methodological recommendations for the application of the Classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Diamonds]. Moscow: MPR, 2007, 37 p. (In Russ.)
4. Vlasov V.M., Androsov A.D., Beskrovanov V.V. The level of modern crystal-saving technologies for diamond mining in the North. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2001, no. 8, pp. 5–6. (In Russ.)
5. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F. The state and prospects of the development of mineral processing technologies at diamond mines of JSC ALROSA (PJSC). *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2017, no. 2, pp. 6–13. (In Russ.)
6. Anistratov Yu.I., Borshch-Komponiets L.V., Anistratov K.Yu. Efficiency of opencast development of deposits in natural and technological zones. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1990, no. 8, pp. 19–24. (In Russ.)
7. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.)
8. Rylnikova M.V., Shvabenland E.E. Features of ore mass quality management in the open mining of complex structure apatite ore deposits by surface miners. *Ratsionalnoe osvoenie nedr* [Mineral Mining and Conservation], 2019, no. 2–3, pp. 80–86. (In Russ.)
9. Palei S., Karmakar N., Paliwal P., Schimm B. Optimization of productivity with surface miner using conveyor loading and truck dispatch system. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013, vol. 2, no. 9, pp. 393–396.
10. Ermakov S.A., Burakov A.M. Improvement of geotechnologies of surface mining the deposits of permafrost zone. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsurface Use], 2014, no. 3, pp. 96–104. (In Russ.)
11. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods: The Underlying Concepts. – Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.
12. Pikhler M., Dikk F., Pankevich Yu.B. Wirtgen surface miners are mining diamonds in Alaska. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2009, no. 4, pp. 14–15. (In Russ.)

13. Montyanova A.N. On the issue of automation of the technology of stowing operations during the combine breaking of ore from primary diamond deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2010, no. 2, pp. 343–353. (In Russ.)
14. Yakovlev V.L., Tarasov P.I., Furin V.O., Zyryanov I.V. *Uglubochnyi kompleks dlya dorabotki kimberlitovykh karerov* [A deep complex for the completion of kimberlite quarries]. Yekaterinburg: UB RAS, 2015, 268 p. (In Russ.)
15. Shobolova L.P., Kovorova V.V. On the creation of a combined technology for the development of kimberlites with the use of liquid and gaseous surfactants. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2000, no. 1, pp. 178–179. (In Russ.)
16. Androsov A.D., Vlasov V.M., Alkov S.P., Akishev A.N. *Sposob razrabotki kimberlitovykh trubok* [Method of development of kimberlite pipes]. Patent RF, no. 2158827, 2000.
17. Rasskazov I.Yu., Sekisov G.V., Sekisov A.G., Cheban A.Yu., Khrunina N.P. *Sposob razrabotki rudnykh mestorozhdeniy almazov s primeneniem selektivnoy podgotovki gornyykh porod k vyemke* [Method of development of diamond ore deposits with the use of selective preparation of rocks for excavation]. Patent RF, no. 2664283, 2018.
18. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Shevchenko Yu.S., Manzyrev D.V. Geotechnology of extracting dispersed and "thin" gold from industrial minerals of Zabaikalsky Krai. *Vestnik Zabaykalskogo universiteta* [Vestnik of Transbaikalian University], 2012, no. 1, pp. 34–41. (In Russ.)
19. Egorov D.G. Advantages of drilling out cylindrical products from stone in quarries and methods of separating them from the rock mass. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2006, vol. 167, pp. 10–12. (In Russ.)
20. Budko A.V., Zakalinsky V.M., Rubtsov S.K., Blinov A.A. *Sovershenstvovanie skvazhinnoy otбойki* [Improvement of borehole drilling]. Moscow: Nedra, 1981, 199 p. (In Russ.)

Поступила 19.03.2021; принята к публикации 30.04.2021; опубликована 28.06.2021
Submitted 19/03/2021; revised 30/04/2021; published 28/06/2021

Секисов Артур Геннадиевич – 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

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

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. Email: 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. Email: chebanay@mail.ru