

## ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫЕМКИ РУД ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИСТАЛЛОСЫРЬЯ

А.Ю. Чебан<sup>1</sup>, А.Г. Секисов<sup>1</sup>, Н.П. Хрунина<sup>1</sup>, Ю.А. Васянович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия,  
e-mail: chebanay@mail.ru

<sup>2</sup> Дальневосточный Федеральный университет, Владивосток, Россия

**Аннотация:** Важной задачей развития горного производства при добыче кристаллосырья является создание новых и совершенствование традиционных технологий, обеспечивающих максимальное сохранение природного качества кристаллов. Повысить эффективность разработки возможно за счет рационального сочетания технологических процессов и оборудования с учетом природных свойств отдельных участков месторождения, которое позволяет значительно снизить потери качества сырья при его выемке и уменьшить затраты на разработку. В настоящее время в России основной объем кимберлитовых руд добывается по традиционной технологии с применением буровзрывных работ, что отрицательно сказывается на сохранности алмазов, постепенно расширяется область безвзрывной выемки с применением комбайнов различных конструкций, роторных экскаваторов и другого оборудования. Вопрос эффективной отработки природно-технологических зон месторождений кимберлитов, отличающихся ценностью и прочностными свойствами руд, возможно решать путем применения комбинированных способов выемки, когда каждая из зон обрабатывается своим комплексом оборудования. Проведен анализ технологий комбинированной выемки руд при разработке месторождений кристаллосырья с применением различных комплексов механического выемочного оборудования, а также гидромеханической выемки, взрывных и специальных методов рыхления (разупрочнения) массива. Предложена комбинированная технология подземной отработки коренных месторождений алмазов, заключающаяся в механической выемке участков ценных руд и щадящем взрывании остального массива, с формированием по периметру рудного тела защитного слоя с дренажными трубами для перепуска рассолов с вышележащих водоносных горизонтов. Также предложен способ селективной подготовки кимберлитовых руд к выемке.

**Ключевые слова:** кимберлитовые руды, сохранность кристаллов, рыхление, выемка, комбайны, экскаваторы, специальные методы разупрочнения, технологии.

**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.

**Для цитирования:** Чебан А. Ю., Секисов А. Г., Хрунина Н. П., Васянович Ю. А. Технологии комбинированной выемки руд при разработке месторождений кристаллосырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 55–67. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_55.

---

## Mixed-type technology of crystal mineral mining

A.Yu. Cheban<sup>1</sup>, A.G. Sekisov<sup>1</sup>, N.P. Khrunina<sup>1</sup>, Yu.A. Vasyanovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia,  
e-mail: chebanay@mail.ru

<sup>2</sup> Far East Federal University, Vladivostok, Russia

---

**Abstract:** A mission of the crystal mineral mining industry is creation and improvement of new and conventional technologies that provide maximum preservation of natural quality of crystals. It is possible to enhance mining efficiency by integrating rationally technologies and equipment with regard to natural properties of individual areas within a deposit. This can considerably reduce the loss of mineral quality in the course of mining and can save the extraction cost. In Russia the conventional technology of kimberlite mining includes drilling-and-blasting, which affects integrity of diamonds. In the meanwhile, blast free mining gradually finds wider application with the use of different design cutters, rotary excavators and other equipment. Regarding kimberlite, which is a high-value and high-strength ore, the effective extraction is possible via combining different mining methods and equipment in different zones of a deposit. This article reviews the mixed-type technologies of crystal mineral mining using different sets of extracting machinery, water-assisted mining, blasting and rock loosening (softening) techniques. The authors propose a mixed-type technology of underground mining of primary diamond deposits, including mechanical cutting in areas of high-value ore and moderate blasting in the rest rock mass, with generation of a perimeter protection layer with drainage piping for by-pass of brines from upper lying aquifers. Furthermore, the article puts forward a method of selective preparation of kimberlite ore for mining.

**Key words:** kimberlite ore, integrity of crystals, loosening, extraction, cutters, excavators, special softening techniques, technologies.

**Acknowledgements:** The research used the resources of the Scientific Knowledge Sharing Center supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-15-2021-663.

**For citation:** Cheban A. Yu., Sekisov A. G., Khrunina N. P., Vasyanovich Yu. A. Mixed-type technology of crystal mineral mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(7):55-67. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_55.

---

### Введение

В современных условиях комплексное освоение недр подразумевает не только безотходное или малоотходное использование извлекаемых в ходе освоения участка недр георесурсов с оптимизацией контуров карьера, но и (в ряде случаев) максимальное сохранение природного качества минерального сырья в процессе подготовки его к выемке, собственно выемки и последующей переработки

[1 – 3]. Это условие в первую очередь может быть обеспечено рациональным сочетанием технологических процессов и оборудования при ведении горных работ [4 – 5]. Поэтому важной задачей при совершенствовании технологий разработки месторождений кимберлитов является обеспечение максимальной сохранности форм, размеров и структуры содержащихся в руде кристаллов. Повысить эффективность разработки корен-

ных 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]. В России 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. Недостатки взрывного рыхления горных пород общеизвестны, к ним можно отнести необходимость прекращения горных работ и отвода техники из зоны взрыва, выход негабарита, снижение устойчивости горных выработок, дополнительные простои по причине загазованности рабочего пространства продуктами взрыва, а также существенное снижение природного качества и стоимости кристаллосырья [7 – 8].

### **Механическая выемка кимберлитов**

Существенно различающиеся прочностные характеристики и ценность руд месторождений и их отдельных участков (природно-технологических зон) обуславливают необходимость применения дифференцированного подхода к выбору технологий разработки [6]. Так, на руднике «Интернациональный» средняя цена алмазов составляет 245 долл. за карат при среднем содержании 8,6 карат/т, а на руднике «Айхал» данные показатели равны 53 долл. за карат и 4,6 карат/т [8]. Повысить сохранность добываемого кристаллосырья возможно за счет отказа от взрывного рыхления. Переход на механический способ выемки руды обеспечивает увеличение стоимости продукции на 10 – 14% за счет роста выхода крупных кристаллов алмазов [8].

Совершенствование горного оборудования позволяет вести успешную механическую выемку известняков, апатитов, фосфоритов, кимберлитов, угля и других полезных ископаемых [9 – 12]. При разработке кимберлитовых трубок успешно используются горные комбайны, рыхлители на базе тяжелых тракторов, гидравлические карьерные экскаваторы и другое оборудование [13 – 16]. Например, в Якутии при разработке карьера трубки «Удачная» был задействован роторный экскаватор К-650 с повышенным усилием копания на выемке кимберлитов прочностью до 8 единиц по шкале М.М. Протодьяконова. Промышленные испытания подтвердили возможность разработки относительно прочных кимберлитовых руд, а также показали, что отказ от взрывного разупрочнения массива повысил сохранность кристаллов и снизил энергоемкость последующей переработки руды на 15 – 20% [15].

В США на кимберлитовом руднике Koala (Аляска), на котором одновременно ведутся открытые и подземные работы, на карьере задействованы комбайны Wirtgen 2200SM-TT, работающие при температурах окружающего воздуха до –40 °С [14]. Применение комбайнов позволило не только повысить сохранность добываемых алмазов, но и обеспечить возможность ведения открытых горных работ в непосредственной близости от подземных выработок. Вынутая комбайнами кимберлитовая руда грузится в автотранспорт, либо отсыпается в штабель или открытую траншею с последующей выемкой одноковшовыми погрузчиками.

Известна технологическая схема разработки кимберлитовых трубок с помощью комплекса, включающего специальные «углубочные экскаваторы» и гусеничные самосвалы [17]. Применение данного оборудования позволяет вести интенсивное углубление карьера на за-

вершающем этапе его отработки с углами рабочих и нерабочих бортов, близкими к предельным, это достигается, прежде всего, за счет повышения в 2–4 раза уклонов транспортных коммуникаций, по которым двигаются гусеничные транспортные средства.

Глубина ведения горных работ при освоении месторождений кимберлитов непрерывно возрастает [18–19]. 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 и закладкой выработанного пространства [19]. Проведенные опытно-промышленные испытания усовершенствованной технологии с применением комбайнов АМ-75 и АМ-105 на очистной выемке подтвердили расчетные показатели. Наибольший эффект комбайновая выемка дает при отработке высокоценных руд, хотя при этом себестоимость добычи возрастает на 20–25% по сравнению с буровзрывной технологией.

### **Комбинированные технологии выемки кристаллосырья**

Для обеспечения максимальной сохранности природного качества кристаллосырья целесообразно применение комбинированных технологий выемки при отработке природно-технологических зон, отличающихся крупностью кристаллов, прочностными свойствами, минералогическим составом, когда каждая из зон обрабатывается своим комплексом оборудования. При этом наибольший эффект будет обеспечиваться при максимальной совместимости технических характеристик оборудования, обеспечивающих необходимую производительность и сохранность минерального сырья при приемлемой себестоимости и энергоемкости процессов, с природными

условиями зоны. Комбинированные технологии добычи могут осуществляться с применением взрывных и специальных методов рыхления (разупрочнения) массива, гидромеханической выемки, а также механического рыхления и извлечения с применением различных комплексов горного оборудования.

Известен способ селективной разработки кимберлитов, заключающийся в оконтуривании массива с выделением природно-технологических зон с учетом прочности и ценности руд [20]. Выделяются руды высокой, средней и низкой ценности, исходя из прочности пород на одноосное сжатие, выделяются зоны, имеющие прочность менее 30, 30–40, 40–60 и более 60 МПа. Руды низкой ценности предполагается рыхлить с применением буровзрывных работ и осуществлять последующую их выемку одноковшовыми экскаваторами. Тракторным рыхлителем предлагается вести дезинтеграцию руд высокой ценности прочностью до 40 МПа с последующим размачиванием разрыхленной руды высокоминерализованным рассолом в специальном котловане, в который руда перемещается бульдозером. Выемку руд высокой ценности с прочностью более 40 МПа предлагается осуществлять с применением компактного роторного экскаватора с повышенным усилием копания. Возможны варианты отработки выделяемых природно-технологических зон с применением карьерных комбайнов, а также гидравлических экскаваторов, причем разработка руды экскаваторами может вестись как из целика, так и из предварительно взорванного массива.

В Южно-Африканской республике согласно проекту компании Namdeb Diamond Corporation (Pty) Limited предлагается навскрыше алмазорудного месторождения использовать гидравлическую драгу с обогатительной установкой в свя-

зи с тем, что вскрышные породы также содержат алмазы [21]. После отработки вскрыши планируется осушение карьера и его последующая отработка открытым способом.

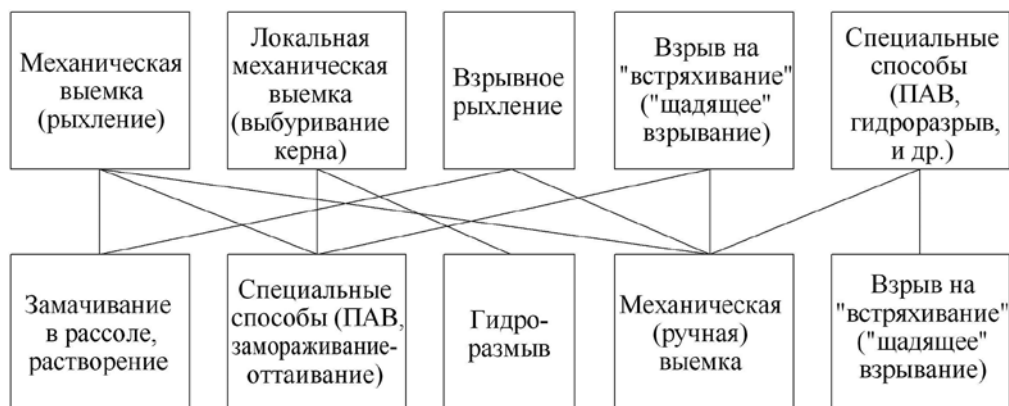
В АО «Алмазы Анабара» совместно с ИГДС СО РАН успешно опробована комбинированная технология извлечения алмазов и золота при переработке алмазосодержащих песков [22].

Известны технологии разработки малообъемных месторождений алмазов, в частности, послойно-скважинный способ выемки, заключающийся в комбинировании послойно бульдозерной отработки кимберлитов и бурошнековой выемки, а также технология выемки кимберлитов путем выбуривания керна большого диаметра [23]. Для получения керна бурится скважина большого диаметра кольцевым забоем с подрезкой обуренного цилиндрического столба массива, затем осуществляется подъем его на поверхность и последующая закладка выработанного пространства.

Керны большого диаметра доставляют на обогатительную фабрику и размывают их высоконапорными гидромониторами, после чего пульпу направляют на обогатительное оборудование, применяемое при дражной добыче алмазов.

В связи с тем, что некоторые участки массивов кимберлита имеют повышенную прочность, их отработка только механическими средствами выемки не всегда эффективна. Ведутся исследования, направленные на разработку высокоинтенсивных систем с применением взрывного и механического рыхления кимберлитов. Так, предложена комбинированная технология разработки трубки «Удачная», согласно которой очистные работы предлагается вести с применением комбайнов, а выемку отдельных, особо прочных участков — с применением буровзрывного способа [24].

В работе [25] с целью снижения энергоемкости механической выемки предлагается механизированный комплекс для добычи кимберлита. Разупрочнение массива осуществляется посредством взрыва на «встряхивание», в результате которого в массиве образуется система трещин без нарушения его целостности. Таким образом, комбинация оборудования и способов его применения (рисунков) возможны не только при разработке (подготовка массива пород к выемке, — рыхление, разупрочнение, — выемка либо последующая дезинтеграция горной массы) различных природно-технологических зон, но и в пределах одной зоны.



Комбинация способов дезинтеграции и выемки горных пород природно-технологической зоны  
 Combination of methods of rock disintegration and cutting in natural-and-manmade zone

Известна технологическая схема рыхления и выемки кимберлитов с использованием гидравлических экскаваторов, оборудованных сменными рыхлителями [7]. После рыхления массива посредством быстроразъемного соединения производится замена рыхлителя на ковш и осуществляется погрузка разрыхленной горной массы в транспортные средства.

Перспективным направлением развития технологий безвзрывной выемки является применение для разупрочнения горных массивов поверхностно-активных веществ (ПАВ). Исследования по разупрочнению кимберлитов посредством воздействия на них жидких и газообразных ПАВ показали, что обработка кимберлитов растворами ПАВ приводит к снижению прочности на одноосное сжатие на 50%, в случае последовательного комбинированного воздействия на породу диоксида углерода и раствора ПАВ прочность кимберлита снижается в 2,5 – 3,5 раза. Обработка массива растворами ПАВ обычно проводится через сетку пробуренных скважин, кроме того, применение ПАВ во время бурения будет способствовать увеличению скорости бурения [26], после разупрочнения массива ведется выемка кимберлитов гидравлическим экскаватором. Также предлагается технология подземной отработки кимберлитов проходческим комбайном с исполнительным органом избирательного действия и применением раствора ПАВ для орошения поверхности забоя.

В работе [16] предлагается комбинированный способ для доработки месторождений кимберлитов в условиях многолетней мерзлоты, который заключается в колонковом выбурировании керна породы большого диаметра, при этом бурение осуществляется термофрикционным исполнительным органом с нагревом породы и последующей подачей в скважину раствора ПАВ. После извлечения керна проводится один или два

цикла его замораживания и оттаивания, в результате чего происходит снижение прочности кимберлита.

Технология разработки алмазосодержащих месторождений калийных солей [27] обеспечивает комплексность отработки горнорудного сырья путем совместной добычи алмазов и калийных солей. После проходки подземных подготовительных выработок комбайнами производится оконтуривание алмазоносной зоны, в которой ведется отбор проб с последующим растворением их солевой составляющей и обогащением методом автоклавного термохимического разложения гидравлической отсадкой.

Известны технологии комбинированной разработки других видов кристаллосырья, а также самоцветов, обеспечивающие повышение их сохранности при добыче [28 – 32]. Для снижения потерь ценности кристаллов рубинов при разработке месторождений корундов предлагается технология и технологические средства гидроразрыва горных пород в комбинации с «щадящим» взрыванием с эффектом декаплинга для отбойки сформированных гидроразрывом блоков с сохранением их целостности [28].

В работе [29] предлагается комбинированная кристаллосберегающая технология отработки месторождения цветного турмалина, предусматривающая щадящие параметры буровзрывных работ при проходке врезной траншеи, буро-клиновую отбойку пегматитовой жилы для вскрытия турмалиновых гнезд (объемом от 0,2 до 2 – 3 м<sup>3</sup>) и ручную выемку кристаллов турмалина и дымчатого кварца. Также отбойку пегматитов возможно производить с использованием невзрывных разрушающих составов (НРС), размещаемых в шпурах и смачиваемых водой, в результате чего НРС твердеет, увеличивается в объеме и создает давление на стенки шпура величиной до 50 МПа.

Технологии подземной разработки пьезокварца [30] направлены, прежде всего, на обеспечение сохранности кристаллов и повышение выхода кондиционного по кусковатости кварцевого сырья. Сеть подземных выработок проходит обычно с применением буровзрывных работ, при проведении очистных ортов бурятся контрольные шпуры для обнаружения полостей с минеральным сырьем. Вскрытие полостей осуществляется механическим путем или с применением «щадящего» взрывания, после чего минеральное сырье, которое содержится внутри полостей, в виде рыхлой горной массы извлекается вручную либо с помощью средств механизации.

В ИПКОН РАН разработан способ подземной разработки кимберлитовых трубок с комбинацией механического и взрывного рыхления массива [31]. Из верхней выработки бурят вертикальные ряды взрывных скважин на всю высоту прирезки, затем между рядами взрывных скважин посредством бурового комплекса бурятся пилотные скважины, расширяемые потом до большого диаметра. Разрыхленная расширителем руда после частичного выпуска магазинируется в формируемых полостях. После окончания бурения всех полостей производится отбойка рудных перемычек с последующей выемкой рудной массы погрузочно-доставочными машинами.

### **Результаты**

Институтом горного дела ДВО РАН предлагается комбинированная технология подземной отработки коренных месторождений алмазов [33], заключающаяся в проведении кольцевых выработок, располагающихся по периметру кимберлитовой трубки, формировании восстающих на высоту этажа путем бурения скважин малого диаметра с их последующим расширением. При этом

на основании данных геологоразведки восстающие проводятся преимущественно по зонам рудного тела, содержащим кристаллы ювелирных классов. В восстающих размещаются дренажные трубы для перепуска рассолов с вышележащих водоносных горизонтов в дренажный штрек, после чего восстающие заполняются твердеющей закладкой с целью превращения их в искусственные целики.

С применением «щадящего» взрывания производится последовательное рыхление приконтурных участков, располагающихся между искусственными целиками, с выпуском руды и последующим заполнением полученных пустот комбинированной закладкой («сухой» и твердеющей), с формированием по периметру рудного тела защитного слоя. После чего с использованием технологии «щадящего» взрывания панель отрабатывается поблочно. «Щадящее» взрывание осуществляется за счет взрывоинъекций природных рассолов в подготавливаемый участок массива кимберлитов. Для этого в центральных и/или периферийных частях взрывных скважин размещают тонкостенные пластиковые трубки, заполненные природным рассолом и запаянные с торцов.

При взрывании таких зарядов начальный скачок давления взрывных газов на стенки взрывных скважин будет, как и при использовании зарядов с «воздушными» промежутками, существенно меньше такового для взрывания сплошных зарядов ВВ, поскольку они будут первоначально перемещаться преимущественно к центру скважин. Соответственно, при таком взрывании существенно будут снижены геометрические параметры зон дробления, зон радиального трещинообразования, а в зонах предразрушения (по А.Н. Качанову) — количество наведенных микротрещин. Образующиеся при термобарическом

воздействии взрывных газов на рассолы перегретые пары активно взаимодействуют с минеральной массой цемента (серпентином, кальцитом, флогопитом), что способствует нарушению их связей с обломочным материалом и, следовательно, дезинтеграции кимберлита, щадящей для содержащихся в нем кристаллов алмазов.

Взрывное рыхление массива кимберлитов негативно сказывается на сохранности качества алмазов, в особенности это касается крупных кристаллов. Так, по данным ЦНИГРИ при ведении буровзрывных работ на рудниках компании «Де Бирс» доля разрушенных алмазов размером 5 мм — 14,3%; размером 10 мм — 28,6%; 15 мм — 42,9%; 20 мм — 57,2%; 25 мм — 71,5%; 30 мм — 85,8%; 35 мм — 100% [34]. В ИГД ДВО РАН разработаны способы комбинированной разработки месторождений кимберлитов с опережающей безвзрывной выемкой локальных участков рудного массива с повышенным содержанием алмазов высокой ценности [35–36]. Так, способ освоения рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке [35] заключается в предварительном локальном разупрочнении участков рудного массива с повышенным содержанием алмазов высокой ценности через скважины электрогидравлическим устройством за счет инъецирования электроразрядом жидкостно-газовой смеси природного рассола в микротрещины. После разупрочнения производится выбуривание руды путем расширения скважин.

В кристаллосберегающей технологии разработки кимберлитовых месторождений открытым способом [36] предлагается производить извлечение руды особо высокой ценности путем выбуривания ядра большого диаметра с дальнейшим его разупрочнением путем

размачивания в природных рассолах и последующей переработки щадящими методами. На основании исследований, проведенных совместно с сотрудниками МГРИ-РГГРУ, установлено, что обработка образцов кимберлитового материала, отобранного на ряде кимберлитовых месторождений Якутии, неактивированными природными рассолами обеспечило снижение прочности на одноосное сжатие на 30–35%, а обработка образцов природными рассолами, активированными электровоздействием — на 45–55%. Также были проведены исследования фракционного состава материала полученного в процессе разрушения образцов кимберлитов в естественном состоянии и после разупрочнения, при разрушении образцов кимберлитов в естественном состоянии выход крупной фракции +50 мм составлял 18–23%, а выход мелкой фракции –5 мм — 4–6%. При разрушении образцов кимберлитов после их разупрочнения природными рассолами выход крупной фракции +50 мм составлял 27–35%, а выход мелкой фракции –5 мм — 35–40%. Данные результаты подтверждают демпфирующее действие природных рассолов на минеральный комплекс кимберлитов, обеспечивающее повышение сохранности кристаллов крупных алмазов.

### **Заключение**

Значительно варьирующие физико-механические свойства, минералогический состав и ценность руд коренных месторождений кристаллосырья определяют необходимость выделения в залежи природно-технологических зон для разработки их с применением различного оборудования. Для повышения сохранности кристаллов может применяться предварительное разупрочнение массива перед выемкой с помощью специальных средств. Комбинированные способы выемки кристаллосырья обес-



печивают рациональное сочетание горного оборудования и технологических процессов для повышения эффективности ведения горных работ, снижения энергоемкости работ, увеличения со-

хранности качества кристаллов. При этом наиболее щадящие методы выемки применяются для природно-технологических зон, содержащих кристаллы ювелирных классов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов Г. С., Пастихин Д. В. Оптимизация конечного контура карьера ГОКа им. В. Гриба с учетом схемы вскрытия // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № S11. — С. 3–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-11-3-12.

2. Smit K. V., Shor R. Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia // *Gems & Gemology*. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 144–167. DOI: 10.5741/GEMS.53.2.144.

3. Крамсков Н. П., Вохмин С. А., Требуш Ю. П., Курчин Г. С., Майоров Е. С. Методика нормирования потерь и разубоживания руды при подземной разработке кимберлитовой трубки «Айхал» // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 34–37.

4. Leach P., Heyden B., Ravenscroft P. A novel economic-filter for evaluating sub-Saharan diamondiferous kimberlites // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 120, no. 9, pp. 541–545. DOI: 10.17159/2411-9717/1173/2020.

5. Секисов Г. В., Чебан А. Ю. Малоотходная технология освоения сложноструктурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 6. — С. 110–118. DOI: 10.15372/FTPRPI20210610.

6. Анистратов Ю. И., Борщ-Компониец Л. В., Анистратов К. Ю. Эффективность открытой разработки месторождений по природно-технологическим зонам // Горный журнал. — 1990. — № 8. — С. 19–24.

7. Анистратов Ю. И., Анистратов К. Ю., Щадов М. И. Справочник по открытым горным работам. — М.: НТЦ «Горное дело», 2010. — 700 с.

8. 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.

9. Cheban A. Yu., Khrunina N. P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass // *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018, vol. 38, pp. 100–114. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.38.100.

10. Kumar C., Kumaraswamidhas L. A., Murthy V. M. S. R., Prakash A. Experimental investigations on thermal behavior during pick-rock interaction and optimization of operating parameters of surface miner // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 133, article 104360. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104360.

11. Чебан А. Ю. Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 247–254.

12. Чебан А. Ю. Технология разработки сложноструктурного месторождения апатитов и выемочно-сортировочный комплекс для ее осуществления // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 399–404. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.399.

13. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on caving mining methods: the underlying concepts. Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.

14. Пихлер М., Дикк Ф., Панкевич Ю. Б. Комбайны Wirtgen Surface Miner на добыче алмазов на Аляске // Горная промышленность. — 2009. — № 4. — С. 14–15.

15. Yucong P., Quansheng L., Qi L. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction // *Acta Geotechnical*. 2020, vol. 15, no. 6, pp. 1481–1500.

16. Ермаков С. А., Бураков А. М. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений криолитозоны // Проблемы недропользования. — 2014. — № 3. — С. 96–104.

17. Тарасов П. И., Журавлев А. Г., Фурин В. О. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 9. — С. 2–10.

18. Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В. Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников «Интернациональный» и «Мир» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11. — С. 57–69. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

19. 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.

20. Ведин А. Т., Анистратов К. Ю., Юрин Н. Н., Рассудов А. В., Безбородов С. М. Патент РФ № 2009318. Способ селективной разработки алмазосодержащих руд. Опубл. 15.03.1994.

21. Геотехнологии открытой добычи минерального сырья со сложными горно-геологическими условиями / Отв. ред. С. М. Ткач. — Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. — 307 с.

22. Очосов О. Ю., Матвеев А. И. Применение метода центробежной концентрации в условиях попутного извлечения золота при обогащении алмазосодержащих песков, разрабатываемых АО «Алмазы Анабара» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 120–129. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-120-129.

23. Ермаков С. А., Федоров Л. Н. Новые способы разработки малообъемных алмазных месторождений и доработки подкарьерных запасов алмаза // Наука и образование. — 2015. — № 4 (80). — С. 62–67.

24. Каплунов Д. Р., Рьльникова М. В., Калмыков В. Н., Петров Ю. А., Суслов В. А. Комбинированная геотехнология при освоении алмазоносного месторождения трубки «Удачная» // Горная промышленность. — 2005. — № 4. — С. 22–26.

25. Клишин В. И., Изаксон В. Ю., Власов В. Н., Власов И. Н., Крамсков Н. П. Патент РФ № 2136887, 10.09.1999. Механизированный комплекс для добычи кимберлита.

26. Николаев Н. И., Леушева Е. Л. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности бурения твердых горных пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2015. — Т. 14. — № 15. — С. 38–47.

27. Рыбальченко А. Я., Рыбальченко Т. М., Квиткин С. Ю., Белкин В. В. Патент РФ № 2286456, 27.10.2006. Способ разработки алмазокалийного месторождения.

28. Барнов Н. Г., Еременко В. А., Кондратенко А. С. Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 3. — С. 200–209.

29. Воронов Е. Т. Кристаллосберегающая технология добычи цветного турмалина // Горный журнал. — 2010. — № 5. — С. 42–44.

30. Воронов Е. Т., Бондарь И. А. Кристаллосберегающие технологии подземной разработки горного хрусталя // Горный журнал. — 2011. — № 11. — С. 23–25.

31. Трубецкой К. Н., Захаров В. Н., Галченко Ю. П. Патент РФ № 2709846, 23.12.2019. Способ подземной разработки кимберлитовых трубок.

32. Деревяшкин И. В., Садыков А. А. Научное обоснование способа промышленной добычи янтаря, предотвращающего его измельчение в забое // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 81–93. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-81-93.

33. Чебан А. Ю. Повышение эффективности комбинированной разработки коренных месторождений алмазов / Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Материалы IV конференции международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. — М.: Изд-во ИПКОН РАН, 2020. — С. 261–264.

34. 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.

35. Рассказов И. Ю., Секисов Г. В., Секисов А. Г., Чебан А. Ю., Хрунина Н. П. Патент РФ № 2664283, 16.08.2018. Способ разработки рудных месторождений алмазов с применением селективной подготовки горных пород к выемке.

36. 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. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13. **МИАБ**

## REFERENCES

1. Fedotov G. S., Pastikhin D. V. Pit optimization considering the deposit stripping method for mining and processing plant named after V. Grib. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S11, pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-11-3-12.

2. Smit K. V., Shor R. Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, Northwestern Russia. *Gems & Gemology*. 2017, vol. 53, no. 2, pp. 144–167. DOI: 10.5741/GEMS.53.2.144.

3. Kramskov N. P., Vokhmin S. A., Trebush Yu. Kurchin G. S., Mayorov E. S. Method of normalization of losses and impoverishment of ore during underground mining of the Aikhal kimberlite pipe. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 12, pp. 34–37. [In Russ].

4. Leach P., Heyden B., Ravenscroft P. A novel economic-filter for evaluating sub-Saharan diamondiferous kimberlites. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 120, no. 9, pp. 541–545. DOI: 10.17159/2411-9717/1173/2020.

5. Sekisov G. V., Cheban A. Yu. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 6, pp. 110–118. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPPI20210610.

6. Anistratov Yu. I., Borshch-Komponiets L. V., Anistratov K. Yu. Efficiency of open-pit mining of deposits in natural-technological zones. *Gornyi Zhurnal*. 1990, no. 8, pp. 19–24. [In Russ].

7. Anistratov Yu. I., Anistratov K. Yu., Shchadov M. I. *Spravochnik po otkrytym gornym robotam* [Handbook of open cast mining], Moscow, NTTS «Gornoe delo», 2010, 700 p.

8. Chaadaev A. C., Zyryanov I. V., Bondarenko I. F. Status and development prospects of mining technologies at diamond mining enterprises of ALROSA PJSC. *Russian Mining Industry*. 2017, no. 2, pp. 6–13. [In Russ].

9. Cheban A. Yu., Khrunina N. P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018, vol. 38, pp. 100–114. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.38.100.

10. Kumar C., Kumaraswamidhas L. A., Murthy V. M. S. R., Prakash A. Experimental investigations on thermal behavior during pick-rock interaction and optimization of operating parameters of surface miner. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 133, article 104360. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104360.

11. Cheban A. Yu. Selective development of the Elginsk coal deposit with using the excavating and sorting complex. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o Zemle*. 2017, no. 4, pp. 247–254. [In Russ].

12. Cheban A. Yu. Technology of development of difficulty-structural deposit of apatitits and excavation-sorting complex for its implementation. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 238, pp. 399–404. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.399.

13. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. *Guidelines on caving mining methods: the underlying concepts*. Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.

14. Pikhler M., Dikk F., Pankevich Yu. B. Combines Wirtgen Surface Miner for diamond mining in Alaska. *Russian Mining Industry*. 2009, no. 4, pp. 14–15. [In Russ].

15. Yucong P., Quansheng L., Qi L. Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction. *Acta Geotechnical*. 2020, vol. 15, no. 6, pp. 1481–1500.

16. Ermakov S. A., Burakov A. M. Improvement of geo-technologies of surface mining the deposits of permafrost zone Perfection of geotechnologies of open pit mining of permafrost zones. *Problems of Subsoil Use*. 2014, no. 3, pp. 96–104. [In Russ].

17. Tarasov P. I., Zhuravlev A. G., Furin V. O. Justification for technological parameters of deepening complex justification of the technological parameters of the deep complex. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2011, no. 9, pp. 2–10. [In Russ].

18. Aynbinder I. I., Ovcharenko O. V. Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 57–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

19. Montyanova A. N. On the issue of automation of the technology for laying operations during the combine mining of ore from primary diamond deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 2, pp. 343–353. [In Russ].

20. Vedin A. T., Anistratov K. Yu., Yurin N. N., Rassudov A. V., Bezborodov S. M. *Patent RU 2009318*. 15.03.1994. [In Russ].

21. *Geotekhnologii otkrytoy dobychi mineral'nogo syr'ya so slozhnymi gorno-geologicheskimi usloviyami*. Otv. red. S. M. Tkach [Geotechnology of open mining of minerals with complex mining and geological conditions. Tkach S. M. (Ed.)], Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2013, 307 p.

22. Ochsov O. Yu., Matveev A. I. Use of centrifugal concentration in by-recovery of gold in diamond-bearing sand processing at Almazy Anabara. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 120–129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-120-129.

23. Ermakov S. A., Fedorov L. N. New methods of development of small volume diamond deposits and excavation of undersurface reserves. *Nauka i obrazovanie*. 2015, no. 4(80), pp. 62–67. [In Russ].

24. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Kalmykov V. N., Petrov Yu. A., Suslov V. A. Combined geotechnology in the development of the diamond deposit of the Udachnaya pipe. *Russian Mining Industry*. 2005, no. 4, pp. 22–26. [In Russ].

25. Klishin V. I., Izakson V. Yu., Vlasov V. N., Vlasov I. N., Kramskov N. P. *Patent RU 2136887*, 10.09.1999. [In Russ].

26. Nikolaev N. I., Leusheva E. L. Theoretical and experimental investigation of hard rock drilling efficiency. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2015, vol. 14, no. 15, pp. 38–47. [In Russ].

27. Rybal'chenko A. Ya., Rybal'chenko T. M., Kvitkin S. YU., Belkin V. V. *Patent RU 2286456*, 27.10.2006. [In Russ].

28. Barnov N. G., Eremenko V. A., Kondratenko A. S. Blasting of hydrofracturing- preconditioned blocks with decoupled explosive charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 3, pp. 200–209. [In Russ].

29. Voronov E. T. Crystallo-saving technology of extraction of colour tourmaline. *Gornyi Zhurnal*. 2010, no. 5, pp. 42–44. [In Russ].

30. Voronov E. T., Bondar I. A. Crystal-saving technology of underground mining of rock crystal. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 11, pp. 23–25. [In Russ].

31. Trubetskoy K. N., Zakharov V. N., Galchenko Yu. P. *Patent RU 2709846*, 23.12.2019. [In Russ].

32. Derevyashkin I. V., Sadykov A. A. Scientific justification of commercial amber production without crushing in work face. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 81–93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-81-93.

33. Cheban A. Yu. Improving the efficiency of combined development of primary diamond deposits. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr. Materialy IV konferentsii mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly akademika RAN K.N. Trubetskogo* [Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior. Materials of the IV conference of the International Scientific School of Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Trubetskoy], Moscow, Izd-vo IPKON RAN, 2020, pp. 261 – 264. [In Russ].

34. Vlasov V. M., Androsov A. D., Beskrovanov V. V. The level of modern crystal-saving technologies for diamond mining in the North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2001, no. 8, pp. 5 – 6. [In Russ].

35. Rasskazov I. Yu., Sekisov G. V., Sekisov A. G., Cheban A. Yu., Khrunina N. P. *Patent RU 2664283*, 16.08.2018. [In Russ].

36. Sekisov A. G., Cheban A. Yu. Crystal-saving technology of open mining of complex structure kimberlite deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021, vol. 19, no. 2, pp. 5 – 13. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-5-13.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Чебан Антон Юрьевич*<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник, e-mail: chebanay@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*Секисов Артур Геннадьевич*<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник, e-mail: sekisovag@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,

*Хрунина Наталья Петровна*<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник, e-mail: npetx@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-8117-0922,

*Васянович Юрий Анатольевич* – д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: vasyanovich\_2011@mail.ru,  
Дальневосточный Федеральный университет.

<sup>1</sup> Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.

**Для контактов:** Чебан А.Ю., e-mail: chebanay@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.Yu. Cheban*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher, e-mail: chebanay@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-2707-626X,

*A.G. Sekisov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Researcher, e-mail: sekisovag@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5780-6150,

*N.P. Khrunina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher, e-mail: npetx@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-8117-0922,

*Yu.A. Vasyanovich*, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: vasyanovich\_2011@mail.ru,  
Far East Federal University, 600091, Vladivostok, Russia,

<sup>1</sup> Mining Institute, Far Eastern Branch  
of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.

**Corresponding author:** A.Yu. Cheban, e-mail: chebanay@mail.ru.

Получена редакцией 03.03.2022; получена после рецензии 28.04.2022; принята к печати 10.06.2022.

Received by the editors 03.03.2022; received after the review 28.04.2022; accepted for printing 10.06.2022.