

УДК 622.014.1

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ АЛМАЗОНОСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Анисимов Кирилл Артемович¹,
anisimov.kirill.95@list.ru

Никифоров Александр Владимирович¹,
nikiforov_av@pers.spmi.ru

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 190106, г. Санкт-Петербург, 21-линия В.О., 2.

Актуальность данной работы состоит в объединении и обобщении опыта ведения открытых, а также подземных горных работ и применения современных наукоемких технологий для экономически эффективной разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых в районах Крайнего Севера России. Проведенный в данной научной статье анализ позволяет дать объективную оценку процессу развития горнопромышленной отрасли в области ведения горных работ на алмазоносных месторождениях полезных ископаемых и внедрения современных высокоэффективных технологий для месторождений со сложными условиями разработки в криолитозоне.

Цель: проведение анализа современных наукоемких технологий разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых, которые расположены в криолитозоне.

Объекты: алмазоносные рудные тела вертикального и субвертикального заложения, расположенные в криолитозоне.

Методы: оценка и анализ опыта ведения открытых и подземных горных работ, которые расположены в криолитозоне, синтез и обобщение материалов, источников и данных, находящихся в открытом доступе, а также современных высокоэффективных наукоемких технологий разработки алмазоносных месторождений полезных ископаемых в климатических районах Крайнего Севера.

Результаты. Были обозначены основные проблемы, которые возникают при отработке кимберлитовых рудных тел, расположенных в криолитозоне, были представлены и обоснованы выводы о дальнейшем эффективном применении оптимальных технологических схем открытой и подземной отработки кимберлитовых рудных тел, которые позволяют обеспечить высокую безопасность при ведении горных работ, дополнительную экономическую эффективность и гибкость технологии производства при отработке кимберлитовых рудных тел в районах Крайнего Севера.

Ключевые слова:

Рудные месторождения, буровзрывные работы, алмазы, алмазодобыча, подземные работы, открытые работы, рынок алмазов, BIM-технологии, цифровизация, кимберлитовая трубка, предохранительная подушка, подкарьерные запасы.

Введение

Сектор добычи минерального сырья является важнейшим элементом мировой экономики и ключевой отраслью Российской Федерации [1–3]. По состоянию на 2021 г. не менее 10,5 % всего ВВП страны связано с добычей полезных ископаемых [4], что дает возможность Правительству Российской Федерации проводить долгосрочную политику по развитию и оптимизации минерально-сырьевой базы страны. Российская Федерация является важным участником мирового рынка минерального сырья, внося свой весомый вклад в развитие многих стран, что позволяет ей при помощи высоких показателей экспорта развивать внутренние рычаги работы горнорудных предприятий – так, Правительством Российской Федерации, в распоряжении № 2914-р от 22 декабря 2018 г. была предложена стратегия развития и разработки минерально-сырьевой базы Российской Федерации на временной промежуток до 2035 г. Данное распоряжение имеет прямое влияние на актуальность поднятой на текущий момент темы, связанной с развитием рынка добычи алмазов. На текущий момент Россия является мировым лидером в добыче и извлечении алмазного сырья алмазоносных месторождений полезных ископаемых – не менее трети всех мировых алмазов были добыты на территории Российской Федерации [1, 3]. Главенствующее место на мировом рынке добычи и переработки алмазного сырья занимает акционерная компания «АЛРОСА» (ПАО) – по

результатам 2021 г. данная компания занимает в мире лидирующие позиции по общему объему добычи неограниченных алмазов, не менее 30 % алмазного сырья было добыто с месторождений АК «АЛРОСА» (ПАО) [5]. В распоряжении правительства Российской Федерации ожидаемый прогноз добычи алмазов к 2025 г. составляет не менее 43,3 миллионов карат [2].

Краткий анализ алмазного рынка

В 2021 г. экспертами Bain & Company был проведен подробный анализ рынка добычи алмазов, где был дан прогноз касательно общего объема добычи алмазного сырья [1]. По их мнению, к 2030 г. мировой рынок ожидает резкое снижение уровня добычи, так, в оптимистичном сценарии, мировой объем добычи снизится со 150 миллионов карат в 2018 г. до 120 миллионов карат к 2030 г., где снижение будет менее болезненным благодаря вовремя введенным в эксплуатацию рудникам и карьерам (рудники «Мир», «Юбилейный», «Заря», «Майская», «Luaxe», «Chidliak», «Star-Orion South», «Tongo-Tonguma Diamond Project» и др.). Консервативный вариант предполагает снижение уровня добычи до 95 млн карат и обосновывается долгим восстановлением мировых экономик после эпидемии коронавирусной инфекции (представленные варианты не предусматривают возможности возникновения форс-мажорных ситуаций в виде продолжения эпидемии, военных действий, рецессий мировых экономик и пр.) [1].

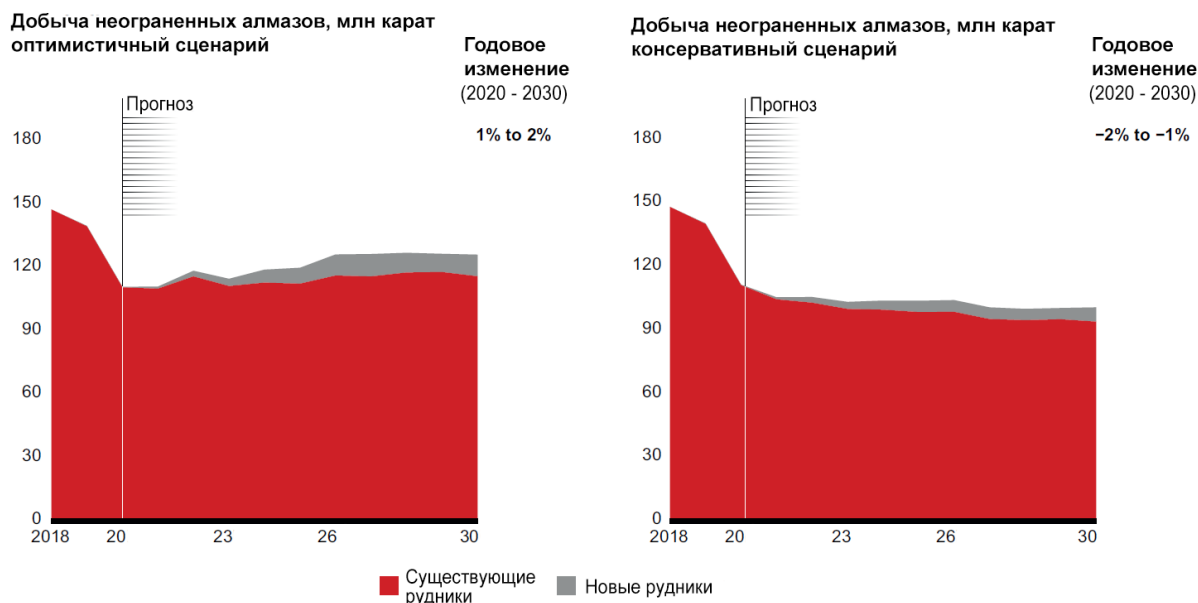


Рис. 1. Ожидаемый график мировой добычи алмазного сырья [1]

Fig. 1. Expected schedule for global rough diamond production [1]

На текущий момент сложно говорить о жизнеспособности данного прогноза, который на момент написания данной научной статьи уже движется по негативному сценарию, однако дальнейшее снижение уровня мировой добычи было связано не столько с плановым закрытием карьеров и рудников в мире и с проходящей эпидемией коронавирусной инфекции, но и с плавным изменением мировой карты потребления алмазов. Так, по состоянию на расчётный 2020 г. не менее 97 % всей прибыли от реализации алмазов занимает сектор ювелирных алмазов, тогда как их объем добычи от общего числа до-

бытых алмазов составляет не более 60 % (не менее 40–45 % всех добываемых алмазов являются индустриальными). Смена поколений способна внести данные изменения – эксперты уже регистрируют снижение уровня потребления населением бриллиантов. Так, поколение Z и миллениалы уже имеют иную модель потребления, что требует от алмазных компаний пересмотра своей маркетинговой стратегии, что, в свою очередь, может вести к снижению общих темпов добычи и снижению необходимости в активной разработке алмазосодержащих месторождений полезных ископаемых [3].

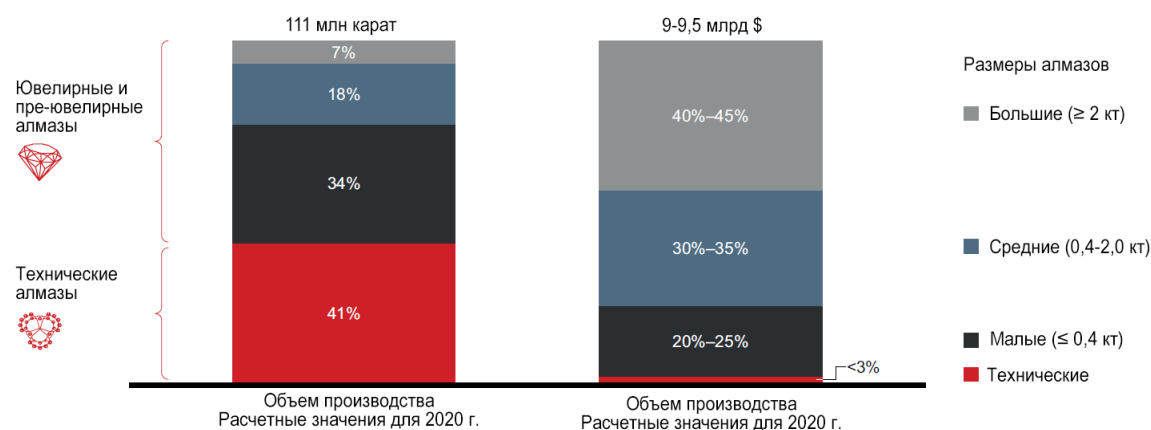


Рис. 2. Рынок потребления алмазов, промышленных и ювелирных [1]

Fig. 2. Market for the consumption of diamonds, industrial and jewelry [1]

Для мирового алмазного рынка сектор добычи алмазного сырья является основополагающим, обеспечивая своей добычей и технологиями устойчивый рост секторов огранки и сбыта бриллиантов. Именно современные высокоэффективные и оптимальные технологии позволяют функционировать, создавать и проектировать новые горнопромышленные объекты. Современная область добычи алмазосодержащего сырья на теку-

щий момент находится в сложном состоянии – мировая пандемия коронавирусной инфекции снизила продажи алмазного сырья на 30 млн карат (не менее 4,1 млрд долл. США), что вынудило алмазодобытчиков запустить программу «Цена выше объема» [1]. По данной программе были закрыты слабоэффективные рудники, некоторые небольшие горнодобывающие компании были вынуждены приостановить свою до-

бычу более чем на 6 месяцев. Снижение объемов продаж для поддержания цены за 1 карат бриллиантов привело к тому, что запасы алмазного сырья на 2021 г. были увеличены более чем на 7 млн карат [1, 6].

Цели и задачи обзора

Технологии добычи алмазного сырья разнообразны, вопросы эффективной добычи, извлечения и обогащения алмазосодержащих руд изучены достаточно сильно мировым сообществом [7, 8]. В данной статье мы сконцентрируемся на области добычи алмазного сырья, методах и технологиях разработки алмазосодержащих руд, не касаясь вопросов бережного извлечения алмазов из руды при помощи специальных инструментов, вопросов общего обогащения руд и поиска новых месторождений полезных ископаемых.

На текущий момент основными регионами для подземной добычи полезных ископаемых являются регионы со слабо развитой инфраструктурой (Крайний Север России, Канада, Центральная и Южная Африка и др.) [9–12]. Подземная разработка таких месторождений полезных ископаемых требует постоянного ведения и совершенствования обширного комплекса научно-исследовательской деятельности по внедрению и применению инновационных технологий по отработке алмазоносных месторождений. Данное утверждение особенно актуально для разработки так называемых переходных зон – части месторождения полезного ископаемого, где завершается открытая разработка полезного ископаемого и начинаются подземные горные работы [13–16].

В России для алмазоносных месторождений задачи по комплексному подземному освоению недр были реализованы целым рядом программ по выполнению научно-исследовательской деятельности силами государственных и частных проектных и научных институтов, а также при непосредственном участии крупнейших алмазодобывающих компаний. Современные тренды развития смогли сформировать требования к горным работам, а сотрудники горнодобывающих

компаний смогли реализовать целые комплексы технологических мероприятий по обеспечению безопасной и устойчивой разработки месторождений.

Основная часть

Структура и особенности алмазодобычи России

Комплексная разработка недр является процессом, требующим применения высоких технологий, – для эффективного освоения алмазоносных месторождений в районах Крайнего Севера необходимо организовать целый комплекс мероприятий, включающий в себя проведение обширных научно-исследовательских работ, проектных и изыскательских мероприятий, целью которых в результате будет являться создание эффективно действующей производственной единицы (карьера, рудника и т. п.). К вышеперечисленному также необходимо добавить необходимость постоянного технического сопровождения функционирования предприятия – для его эффективной работы любой ГОК должен состоять из высококвалифицированных кадров, включать в себя высокопроизводительное и эффективное оборудование в условиях алмазного рынка. Современные тенденции диктуют необходимость цифровизации горного производства, внедрения аспектов технологической программы «Индустрия 4.0» [17–19].

В структуре рынка добычи алмазов России лидирующую позицию занимает акционерная компания АЛРОСА, извлекая более 90 % всех алмазов и удерживая лидерство в мире, обеспечивая не менее трети всей мировой добычи [9]. Все месторождения АК «АЛРОСА» на территории РФ расположены в районах Крайнего Севера, а подземным способом на текущий момент отрабатываются три месторождения – кимберлитовые трубки «Интернациональная», «Айхал» и «Удачная». В дальнейшем планируется вводить в повторную эксплуатацию рудник «Мир», ведутся работы по технико-экономической оценке целесообразности создания подземных рудников после завершения горных работ на действующих карьерах [20].

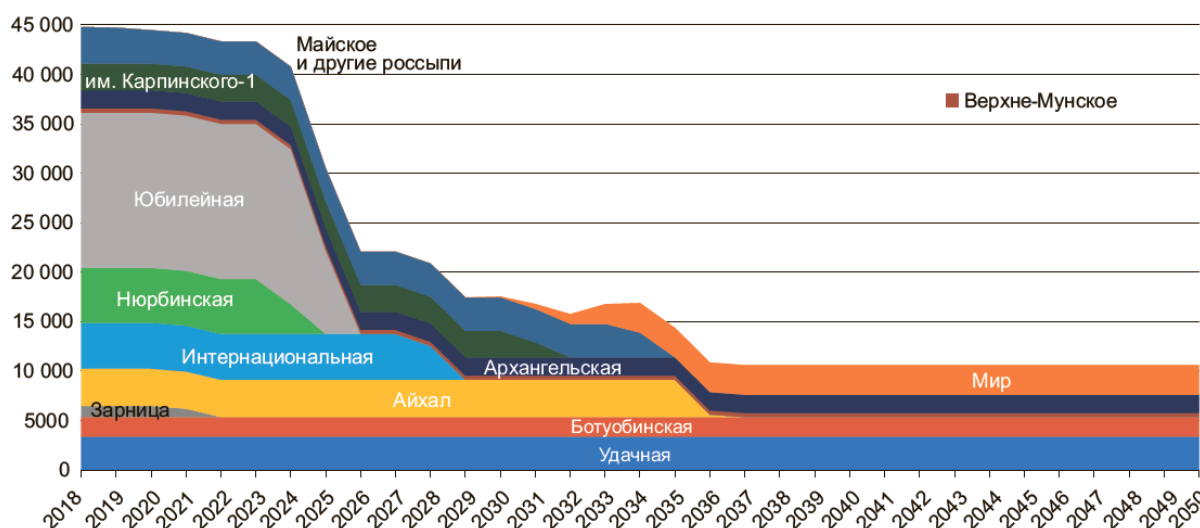


Рис. 3. Прогноз добычи алмазов на существующих месторождениях России на период 2018–2050 гг., млн карат [21]

Fig. 3. Forecast of diamond production at existing deposits in Russia, for the period 2018–2050, million carats [21]

Для месторождений АК «АЛРОСА» характерно ведение горных работ на алмазоносных месторождениях в наиболее непростых горно-геологических и климатических условиях Крайнего Севера. Многообразие и высокая сложность возникающих технических, а также практических задач, которые приходится решать Компании, невозможно без привлечения крупных научных институтов России. Научными работами, связанными с изучением технологии алмазодобычи, занимается множество научных коллективов из различных научных центров и таких крупнейших институтов, как Якутинпроалмаз, ИГД УрО РАН, Гипроникель, ИГД СО РАН, НИТУ МИСИС, СПГУ, ВНИМИ, СФО, ООО НТЦ «НОВОТЭК» и др.

Основные направления исследовательских работ ведущих научных институтов

Наиболее близким технически и географически к горному производству АК «АЛРОСА» (ПАО) является научный институт «Якутинпроалмаз», который проводит многие фундаментальные и прикладные научные исследования, оставаясь основным техническим и научным партнером и генеральным проектировщиком АК «АЛРОСА» (ПАО) на протяжении всего срока функционирования Компании и являясь основным крупнейшим исследовательским центром по разработке технологий алмазодобычи [22]. На текущий момент основным вектором развития института является проведение научно-исследовательских работ, направленных на технологическую эффективность ведения горных работ, цифровизацию горного производства и экологическую безопасность производственных объектов. Большой объем разноплановых научных исследований проектного института «Якутинпроалмаз» решает множественные задачи по эффективной разработке кимберлитовых трубок, обеспечивая устойчивое развитие текущих горных работ. Высокую актуальность возникающих технических задач можно обосновать большим числом горных

производств – активных карьеров и рудников, а также сложными природными и горно-геологическими условиями разработки. В современных условиях, когда именно мировой алмазный рынок является определяющим, необходима постоянная корректировка объема добываемой руды, что в свою очередь является необходимым следствием для процессов модернизации очистных блоков рудников и карьеров. Выполнение данных работ позволит в конечном итоге обеспечивать высокую конкурентоспособность функционирующего горнодобывающего предприятия в непредсказуемых условиях постоянно изменяющихся цен и плавающей структуре затрат [1].

В то же самое время высокую конкурентоспособность горнодобывающего объекта можно обеспечить за счёт гибкого и своевременного изменения порядка и направления развития горных работ. Контроль над изменением размеров рабочей зоны и конструкции очистных блоков при заданных технологических параметрах позволяет при существующих и технических ограничениях обеспечивать оперативное выполнение потребностей получателя продукции. Именно вышеупомянутые процессы и прочие другие (совершенствование карьерного и шахтного транспорта, оптимизация технологических схем разработки, формирование новых конфигураций процессов ведения горных работ и пр.) позволяют в итоге АК «АЛРОСА» (ПАО) оставаться лидером на рынке добычи алмазного сырья.

Большим достижением научного института «Якутинпроалмаз» можно считать создание технологии доработки глубоких карьеров, которая позволяет применить крутонаклонные съезды для дальнейшей доработки карьера [23, 24]. Данная технология сильно изменила особенности ведения открытых горных работ, позволив ощутимо снизить объем вскрышных пород и увеличить максимально рациональную предельную глубину отработки карьера.

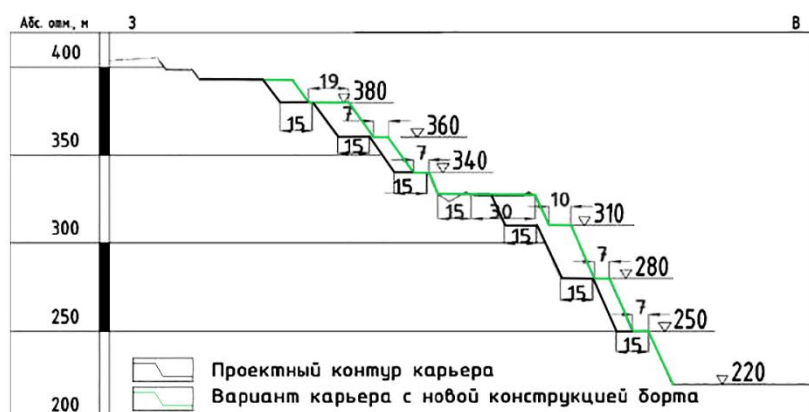


Рис. 3. Вариант отработки карьера [23]

Fig. 3. Quarry development option [23]

Однако в алмазной горнодобывающей промышленности на территории России в начале XXI в. возникали определенные проблемы. Внедрение новых технологических решений и ввод в промышленную

эксплуатацию инновационной техники были резко ограничены ввиду существования ряда устаревших нормативных документов, таких как СНиПы, ВНТП, пунктов правил промышленной безопасности и т. п.,

которые практически не изменялись с 80-х гг. XX в. После десятка лет законодательской работы промышленных комиссий, к 2021 г., данная проблема практически не имеет веса, так как нормативная база РФ была сильно переработана и приведена в соответствие с общемировыми стандартами и практиками. Ярким примером может служить разработка национального стандарта, который функционирует на текущий момент, «Разработка алмазородных месторождений открытым способом в криолитозоне», который напрямую относится к ведению горных работ на алмазоносных месторождениях АК «АЛРОСА» [25].

Институт «Якутнипроалмаз» одним из первых научных организаций предложил внедрить технологии камерных систем разработки с применением закладки для подземного рудника «Айхал», что позволило снизить себестоимость добычи одной тонны руды приблизительно на 11 % по сравнению со слоевы-

ми системами разработки [26, 27]. В то же время геомеханическим обоснованием отдельно было установлено безусловное и очевидное превосходство слоевой нисходящей системы разработки, которая предполагала применение камерно-целикового порядка выемки с применением закладочных работ по устойчивости конструктивных элементов технологии над другими камерными системами разработки при ведении подземных горных работ на руднике «Интернациональный» [28, 29].

Силами сотрудников института были проведены научные работы по обоснованию конструктивных элементов и основных параметров системы разработки с блоковым самообрушением применительно к условиям месторождения трубки «Удачная» [30–32]. Данные работы позволили заявить о возможности применения технологий с массовым обрушением руды и вмещающих пород в условиях Крайнего Севера.

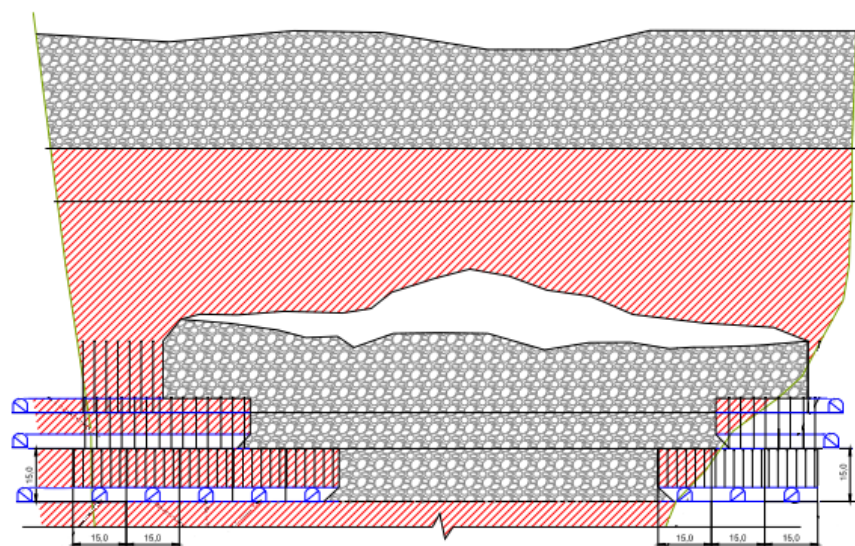


Рис. 4. Вариант системы разработки с самообрушением руды, рудник «Удачный» [33]

Fig. 4. Variant of the block caving mining method, «Udachny» mine [33]

Освоение кимберлитовой трубки «Удачная» осуществляется подземным способом с применением высокопроизводительных систем разработки с обрушением руд – на первом этапе отработки месторождения применяется этажная система разработки с принудительным обрушением и площадным выпуском руды, а в дальнейшем, на втором этапе, планируется перейти к этажному самообрушению руды [34–38]. Данные системы разработки в конечном результате имеют низкую себестоимость добычи руды, а также позволяют обеспечить большие объемы добычи горной массы [39, 40], что в совокупности позволяет экономически эффективно извлекать полезное ископаемое для его дальнейшей обработки на обогачительной фабрике № 12 Удачинского ГОКа. Во время мировой пандемии рудник «Удачный» оказался в числе тех, кто не снизил, но, наоборот, увеличил объем добычи до 4 млн т горной массы в год [5, 20].

Из наиболее новых работ важно отметить создание проекта «Концепция возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир». Выполненная ра-

бота послужила основой для последующей разработки документа «Технологический регламент на вскрытие и разработку запасов месторождения трубки "Мир"», который на текущий момент находится на завершающей стадии утверждения. На текущий момент обоснованы и выбраны места заложения вскрывающих вертикальных стволов, были пробурены контрольно-стволовые скважины, идёт активный поиск вариантов камерной системы разработки с последующей закладкой выработанного пространства [26].

Также были найдены решения и технологически обоснована отработка подкарьерных запасов под обводнённой массой осыпей и поддержании бортов карьера в устойчивом состоянии путём формирования льдопородного искусственного массива в карьере «Интернациональный» с использованием атмосферного холода [41].

Для африканского подразделения АК «АЛРОСА» был разработан комплекс технических решений, позволяющих отработать кимберлитовую трубку «Каток» подземным способом с применением массовых си-

стем с обрушением руд. По результатам выполненных технико-экономических расчётов удалось подтвердить обоснованность данных решений как с экономической точки зрения, так и с точки зрения конструктивных технологических оценок [22, 42]. Ожидается, что в ближайшие годы ещё один подземный рудник будет введен в строй на африканском континенте.

Другой крупный научный институт – Институт Горного дела Уральского отделения Российской Академии Наук (ИГД УрО РАН) – активно проводит свою научную деятельность в области изучения технологий добычи алмазного сырья. Силами сотрудников научного института были сформулированы и предложены к внедрению различные эффективные технологии, направленные на развитие алмазодобывающей промышленности в XXI в. По мнению руководства института, общая направленность проводимых научно-исследовательских работ по горной тематике полностью определяется изменением и состоянием сырьевой базы АК «АЛРОСА» (ПАО), которая на текущий момент обусловлена комплексным переходом ведения горных работ от открытого способа разработки на подземный, что позволяет увеличить срок отработки кимберлитовых алмазоносных тел. Подземные горные работы в целом имеют показатели добычи более низкие, чем открытая разработка. Также продолжается вовлечение в отработку месторождений полезных ископаемых более бедных, удаленных и маломасштабных, что становится возможным благодаря новым технологиям разработки и переработки георесурсов [25, 42–45].

Сотрудники ИГД УрО РАН предложили и обосновали к внедрению комплексную технологию разработки прибортовых и подкарьерных запасов алмазоносных месторождений с применением систем разработки с обрушением руд, которые способны обеспечить высокую безопасность и эффективность горных работ. Применение систем разработки с обрушением руд позволяют достигнуть высокой производительности в 4 млн т горной массы в год. Сотрудниками научного института удалось разработать и обосновать комплекс технологических операций в условиях наличия в рудном массиве карстов, высокой обводненности и газов, что обеспечит бесперебойную работу рудника и его безопасное функционирование [46]. Данные технологии были успешно опробованы и внедрены на руднике «Удачный». В процессе функционирования рудника «Удачный» была рекомендована к применению рациональная конструкция траншейного днища при ведении горных работ с обрушением руд и с применением площадного выпуска руды. Данная конструкция позволяет наиболее полно обеспечить сохранность выпускных горных выработок подэтажа на протяжении всего необходимого периода службы горной выработки, а также позволяет контролировать приемлемый уровень разубоживания и потерь полезного ископаемого [46]. Данная технология позволяет на текущий момент руднику достигать и удерживать высокую годовую производственную мощность. Ещё одной важной и инновационной технологией для ведения подземных горных работ явля-

ется обоснование минимально безопасной мощности (высоты) предохранительного рудопородного подвижного массива (предохранительной подушки). Данная предохранительная подушка сформирована для обеспечения необходимой защиты и изоляции подземных горных работ от влияния атмосферы (открытого пространства карьера), её работа обеспечивается при внедрении систем разработки с самообрушением руды и с принудительным обрушением руды. Сотрудниками ИГД УрО РАН были проведены научные работы по формированию различных способов создания предохранительной подушки, в т. ч. был выполнен комплексный анализ процессов влияния предохранительной подушки и её наличия над горными работами на общую эффективность добычи руды, были разработаны технические мероприятия и рекомендации по выпуску руды, которые позволяют обеспечить поддержание необходимой мощности предохранительной подушки в процессе отработки запасов I очереди отработки до отм. –680 м [47].

Обсуждение результатов деятельности научных институтов

Стоит отметить, что внедрение системы разработки с обрушением руды для алмазоносных рудных тел вертикального и субвертикального заложения не является абсолютно революционной технологией и неизученным в мировой среде вопросом – апробация данных технологий проходила на многих кимберлитовых рудниках других стран [48–51], где перед завершением открытых горных работ вставал вопрос перехода к разработке подземной части месторождения. Данные предохранительные подушки позволяют обеспечить защиту от падения кусков горной породы, защиту от ударно-воздушных волн, вызванных этим падением, а также защищают атмосферу рудника от прямой аэродинамической связи с карьером.

Важным уточнением будет являться и то, что при разработке кимберлитовой трубки «Удачная» были впервые опробованы и внедрены различные инновационные схемы и технологии, применяемые впервые для условий Крайнего Севера. Обоснованием этого можно считать крайне сложные горно-геологические условия разработки, что усложняет процессы ведения подземных горных работ. Ключевой особенностью ведения подземных горных работ на руднике «Удачный» является то, что рудное тело разделяется на два близкорасположенных самостоятельных массива, отработка которых ведется параллельно, с взаимным влиянием друг на друга. Соответственно, важно отметить то, что и подвижных предохранительных массивов также два, что усложняет процессы одновременного контроля и мониторинга за состоянием движения предохранительных подушек [52–54].

Система разработки на руднике, которая включает в себя применение одностадийной выемки и принудительного обрушения горных пород с площадным выпуском руды, состоит из следующих конструктивных элементов системы разработки: доставочные и выпускные штреки с проходкой отрезных восстающих, транспортные орты, расположенные между руд-

ными телами, и погрузочные заезды на подэтаж. На начальном этапе ведения очистных работ происходит отгрузка только части отбитой руды, горная масса подэтажа остается в подземном пространстве рудника и формирует рудную предохранительную подушку, которая в дальнейшем при понижении фронта ведения очистной выемки будет обеспечивать безопасное функционирование рудника. Процент выпуска руды из блока обосновывается глубиной ведения горных работ и мощностью подушки. В плане рудное тело разбивается на панели для отработки бесцеликовым методом, который обосновывает сплошной порядок

выемки запасов на подэтаже. Защитные целики формируются и остаются только над выработками выпуска горной массы, в дальнейшем их погашают при выемке нижележащего подэтажа.

При отбойке полезного ископаемого при данной системе разработки будет присутствовать постоянный боковой контакт руды с обрушенными породами, контроль за ведением процессов выпуска в данном случае будет являться важной научно-практической задачей, а контроль за сдвижением вышележащей предохранительной подушки позволяет обеспечивать безопасное функционирование рудника «Удачный».

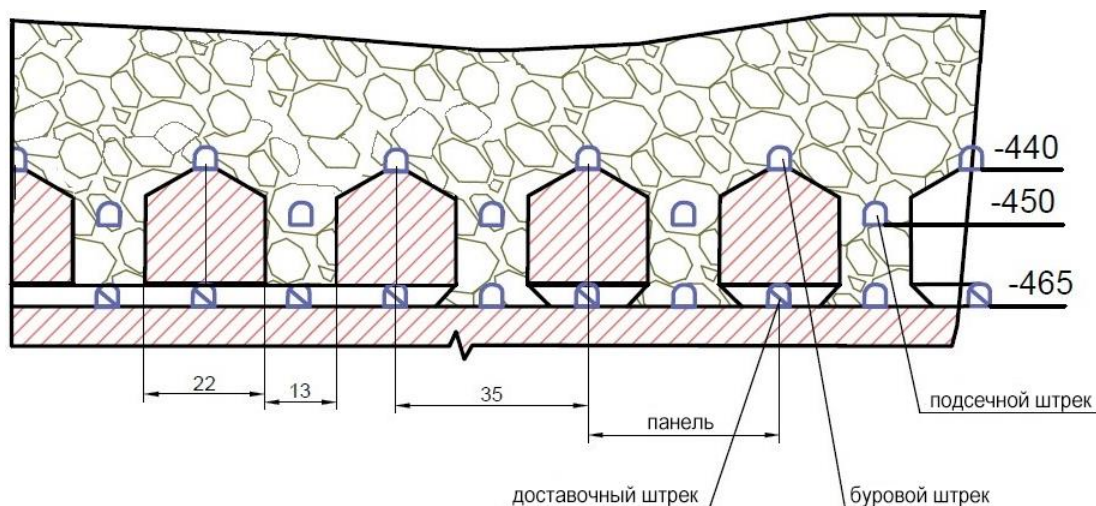


Рис. 5. Вариант системы разработки с обрушением руды, рудник «Удачный» [55]

Fig. 5. Variant of the caving mining method, «Udachny» mine [55]

Современные инновационные научно-исследовательские проекты

Для решения новых технических вызовов по эффективной отработке алмазоносных месторождений необходима цифровизация горного производства. Без внедрения элементов технологий программы «Индустрия 4.0» невозможно выстроить гибкую систему горного производства, которая позволяет функционировать на крайне неустойчивом рынке алмазной добычи [22, 56].

В настоящее время АК «АЛРОСА» осуществляет и внедряет научно-практический проект «Модернизация комплексной системы автоматизированного проектирования» [22]. Применение BIM-технологий является современным и передовым решением в горной отрасли, предполагающим комплексную обработку в трёхмерном представлении всей архитектурно-строительной, конструкторской, технологической, экономической и иной информации о любом производственном или непроизводственном объекте. В качестве перспективных направлений развития планируется:

- создать информационные цифровые двойники ГОКов и прочих объектов АК «АЛРОСА»;
- внедрить технологии лазерного сканирования (с помощью ЛИДАР-систем).

Внедрение BIM-технологий для объектов АК «АЛРОСА» можно разделить на два основных этапа

разработки. Первый этап – создание информационных моделей новых объектов. На данном этапе происходит создание информационной модели с нуля и последующая ее передача в управление капитального строительства Компании. По результатам строительства и/или ведения работ в информационную модель вносится окончательное текущее состояние, и она передается в эксплуатирующую организацию для отслеживания работоспособности объекта, планирования предупредительных и капитальных ремонтов. Второй этап – создание информационных моделей существующих объектов. На данном этапе планируется проведение объемных обмерочных работ при помощи лазерного сканирования действующих объектов с целью формирования актуальной информационной модели.

Создание цифровой модели рудника/карьера/ГОКа позволит более точно, гибко и более эффективно управлять горным производством, что даст возможность внедрять более сложные системы разработки, планируя цикл горной добычи таким образом, чтобы дать максимальный эффект для предприятия. Данные технологии уже зарекомендовали себя на других объектах алмазодобычи. Так, для рудника «Argyle» компании Rio Tinto был внедрен в эксплуатацию цифровой двойник, что позволило более эффективно изменять и контролировать весь цикл горной добычи [2].

Отдельными компонентами, тесно связанными с технологиями отработки кимберлитовых трубок, являются технические решения в области геотехнического обеспечения разработки месторождений. Так, для кимберлитовой трубки «Удачная» были выполнены комплексы работ по натурному исследованию. Данными исследованиями были получены численные значения тектонических напряжений в массиве горных пород. Дополнительно были определены модули деформации массивов горных пород трубки «Удачная». При проведении данных работ была применена новая методика натурных замеров участков породного массива с помощью спутниковых измерений смещений реперных пунктов (системы Глонасс и GPS) в карьере «Удачный». Дополнительно к вышеперечисленному была учтена пространственно-временная изменчивость полей напряжений и деформаций горного массива. Данная изменчивость была обусловлена блочно-иерархической структурой массива, а также его разномодульностью на различных участках исследуемого массива [57, 58]. После проведения натурных исследований авторами были определены итоговые численные значения напряженно-деформированного состояния горного массива подземного рудника им. Ф.Б. Андреева «Удачный». На основании результатов исследований специалистами были подготовлены материалы по обоснованию геомеханических условий подземной разработки кимберлитовой трубки «Удачная» при переходе к подземным горным работам. Данные работы позволили уточнить и скорректировать процессы отработки трубки «Удачная» системами разработки с обрушением руд. Данные работы невозможно было провести без тесного сотрудничества служб геомеханического мониторинга рудника и профильных научных институтов. Ранее было указано, что для условий подземного рудника «Удачный» крайне важную роль играет напряженно-деформированное состояние горных массивов – контроль над их состоянием и сдвижением является важным технологическим процессом, который круглосуточно осуществляет служба геомеханического мониторинга на Удачинском горно-обогатительном комбинате (УГОК) [59]. В этом случае обеспечение безопасной подземной отработки кимберлитовых рудных тел становится задачей, решение которой позволит сформировать базу для устойчивого развития подземных горных работ и безопасной полной отработки кимберлитовых рудных тел на протяжении срока службы всего рудника.

Отдельного упоминания заслуживают крупные научные работы в области технологии проведения буровзрывных работ на месторождениях Крайнего Севера [60]. Исследователями была проведена научно-техническая работа под названием «Обоснование методики расчета и разработка нормативов буров-

взрывных работ для карьеров алмазодобывающих предприятий РФ, расположенных в криолитозоне» [61]. В этой работе был выполнен глубокий анализ теоретических, а также научно-практических исследований, посвященных процессам разрушения неограниченных алмазов во время взрывного нагружения массивов горных пород. Были обоснованы технологии управления процессами трещинообразования в природных кристаллах алмазов, были предложены процессы минимизации повреждений алмазов при взрывах. Данными работами были обоснованы нормативы ведения буровзрывных работ для расположенных в криолитозоне алмазодобывающих карьеров. В дальнейшем была внедрена к промышленному применению таблица категорий горных пород по удельному расходу взрывчатых веществ, что позволило обосновать рациональные параметры изменения буровзрывных работ в условиях Крайнего Севера [61].

Заключение

Наработанный опыт и большое количество научных исследований, проведенных силами ведущих научных коллективов России, направленных на развитие технологий разработки алмазоносных месторождений, неопределимы, благодаря этим работам удается давать ответы на многие актуальные вопросы, касающиеся эффективной разработки месторождений, расположенных в районах Крайнего Севера. На текущий момент можно с уверенностью говорить о том, что весь объем научных исследований, посвященных развитию алмазоносной добычи, крайне высок. Российское содружество горной промышленности и горной науки позволяет сообща решать самые сложные проблемы, возникающие перед горнодобывающими компаниями, которые осваивают труднодоступные и удаленные месторождения России. Сегодняшние совместные усилия научных организаций фокусируются на поиске технических решений по эффективному, малозатратному и высокопроизводительному извлечению минерального сырья. Основные проблемы, возникающие в ходе активной отработки алмазоносных месторождений, такие как загазованность, обводненность, предельные глубины разработок, неустойчивость горного массива, низкое содержание полезного компонента в руде, решаются совместными усилиями ведущих научных институтов России. Проводимые научные работы позволяют внедрять на алмазодобывающих предприятиях комплексы разработанных технических решений, составляющих совокупность основных и вспомогательных технологических процессов, которые обеспечивают повышение устойчивости добычи алмазной продукции и более полное использование минеральных ресурсов, находящихся в разработке крупнейших алмазодобывающих компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Global Diamond Industry 2020–21 / O. Linde, O. Geyler, A. Epstein, K. Rentmeesters // Bain & Company. 2021. URL: <https://www.bain.com/link/4f87f921c98d42eb934c61efa4d6c4f9.aspx> (дата обращения 05.08.2022).

2. Jacques J.-S., Thompson S. Rio Tinto full year results 2019. – England: Rio Tinto, 2019. – 54 p.
3. Cleaver C. The diamond insight report 2019. – England: De Beers UK LTD, 2019. – 56 p.
4. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на 2022 год и на плановый период 2023 и 2024 годов.

- Министерство экономического развития Российской Федерации. 2021. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/d7f5f5da44bd4c30d42aac04cc1fca/prognoz_socialno_ekonom_razvitiya_rf_2022-2024.pdf (дата обращения 05.08.2022).
5. Иванов В.В., Стасенко А.В. Ежеквартальный отчет за 2 квартал 2021 г. АК «АЛРОСА» (ПАО). 2021. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
6. The Kimberley Process Rough Diamond Statistics. URL: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics (дата обращения 05.08.2022).
7. Foley S.F., Yaxley G.M., Kjarsgaard B.A. Kimberlites from source to surface: insights from experiments // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 393–398.
8. Giuliani A., Pearson D.G. Kimberlites: from deep earth to diamond mines // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 377–380.
9. A review of the mineral potential of Liberia / A.G. Gunn, J.K. Dorbor, J.M. Mankelow, P.A.J. Lusty, E.A. Deady, R.A. Shaw, K.M. Goode-nough // *Ore Geology Review*. – 2018. – V. 101. – P. 413–431.
10. Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland / H. Dalton, A. Giuliani, H. O'Brien, D. Phillips, J. Hergt, R. Maas // *Petrol Journal*. – 2019. – V. 60. – P. 2025–2036.
11. Geology of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada / M. Gaudet, C. Muntener, M. Kopylova, V. Zhuk, C. Nathwani // *Mineral Petrol*. – 2018. – V. 112. – P. 433–445.
12. Olson D.W. Mineral commodity summaries 2022. – Reston: U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2022. – 206 p.
13. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. – London: CRC Press, 2021. – 528 p.
14. Kjarsgaard B.A., Januszczak N., Stiefenhofer J. Diamond exploration and resource evaluation of kimberlites // *Elements*. – 2019. – V. 15. – P. 411–416.
15. The discovery of the Argyle pipe, Western Australia: the world's first lamproite hosted diamond mine, Australia / C.B. Smith, W.J. Atkinson, E.W. Tyler, A.E. Hall, I. Macdonald // *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*. – 2018. – V. 20. – P. 49–64.
16. Зубов В.П., Куанг Ф.Л. Разработка ресурсосберегающей технологии выемки пологих угольных пластов с труднообрушающимися породами кровли (на примере шахт Куангинского угольного бассейна) // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 257. – С. 795–806.
17. Григорьева Е.Э., Сентизова Н.Р. Входные барьеры и перспективы развития технологии блокчейн в алмазной индустрии и России // *Цифровая экономика и индустрия 4.0: тенденции 2025*. – СПб, 2019. – С. 147–152. DOI: 10.18720/IEP/2019.1/20
18. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model / M. Sepehri, B.A. Derek, A. Samer, P. Leveille, R.A. Hall // *Engineering geology*. – 2019. – P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>
19. Lépine I., Farrow D. 3D geological modelling of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada: from exploration to extraction // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – P. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00110-018-0567-x>
20. Иванов С.С. Годовой отчет 2020 ПАО «АЛРОСА». АК «АЛРОСА» (ПАО). 2021. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
21. Егорова И.В., Михайлов Б.К. Объектный метод анализа обеспеченности запасами полезных ископаемых на примере России // *Руды и металлы*. – 2021. – Т. 4. – С. 6–21. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.
22. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф. Институту Якутии про алмаз – 50 лет. История и перспективы // *Журнал «Горная Промышленность»*. – 2010. – Т. 6 (94). – С. 6–12.
23. Развитие технологии проходки и формирования на карьере транспортных съездов крутого уклона / А.Н. Акишев, С.Л. Бабаскин, А.А. Кожемякин, Р.В. Никитин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – Т. 12. – С. 58–64.
24. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Управление аэродинамическими процессами при разработке золоторудных месторождений открытым способом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – Т. 2. – С. 99–107. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
25. Современные технологии при добыче и переработке алмазо-содержащего сырья / М.Р. Айгистов, Е.Н. Герасимов, И.Ф. Бондаренко, И.В. Зырянов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – Т. 5-2. – С. 6–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2022_5_2_0_6
26. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р. Разработка алмазорудных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию. – М.: Стандартинформ, 2018. – 156 с.
27. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Бондаренко И.Ф., Состояние и перспективы развития горнообогатительных технологий на алмазодобывающих предприятиях АК «Алроса» (ПАО) // *Горная промышленность*. – 2017. – Т. 2. – С. 6–13.
28. Холмский А.В., Фомин С.И. Обоснование применения технологической схемы безвзрывной отработки на удароопасных бокситовых месторождениях с отбойкой гидромолотами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 7. – С. 40–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2022_7_0_40.
29. Никитин И.В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения // *Проблемы недропользования*. – 2017. – № 1. – С. 21–28.
30. Zuev B.Yu., Zubov V.P., Fedorov A.S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // *Eurasian mining* // 2019. – V. 1. – P. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
31. Герасимов Е.Н., Зырянов И.В., Коваленко Е.Г. Институт Якутии про алмаз: результаты, достижения, планы // *Горный журнал*. – 2021. – Т. 2. – С. 39–47.
32. Tishkov M. Evaluation of caving as a mining method for the Udachnaya underground diamond mine project // *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 835–846. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_66.Tishkov
33. Коваленко А.А., Русских И.Л. Совершенствование технологии отработки запасов трубки «Удачная» с применением систем разработки с самообрушением руды // *V Международная научно-техническая конференция «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений»*. – Екатеринбург, Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 69–82.
34. Соколов И.В., Антипин Ю.Г. Инновационные технологии подземной разработки рудных месторождений // *Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Международная научно-практическая конференция*. – Екатеринбург, 2019. – С. 27–31.
35. Петрова Л.В., Николаев В.В. Выбор оптимального варианта системы с самообрушением и формы подсеки для условий трубки «Удачная» // *Инновации. Наука. Образование*. – 2021. – Т. 36. – С. 1451–1460.
36. Опыт разработки инновационных подземных геотехнологий освоения рудных месторождений / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, Н.В. Гобов, И.В. Никитин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – Т. 3-1. – С. 338–350.
37. Зубов В.П., Антонов А.А. Пример реализации комбинированной системы разработки с самообрушением руды на участке богатых железных руд // *Записки Горного института*. – 2006. – Т. 168. – С. 211–214.
38. Sainsbury B. A sub-level caving algorithm for large-scale, small-strain, numerical simulations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – V. 52. – P. 289–295.
39. Shellsell K.J., Labrecque P.O., Morrison D.M. Increasing productive capacity in block caving mines // *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 107–118.

- URL: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_05_Morrison (дата обращения 05.08.2022).
40. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В. Принципы формирования и критерий оценки геотехнологической стратегии освоения переходных зон рудных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – Т. 9. – С. 151–160.
41. Evaluation of the AKI diamond deposit, Western Australia, Australia / S. Roffey, M.J. Rayner, A.T. Davy, R.W. Platell // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits. – 2018. – V. 20. – P. 65–88.
42. Монтянова А.Н., Ефимов А.И., Таланцев Л.Р. К вопросу оптимизации технологии закладочных работ при комбайновой отбойке руды коренных алмазных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Т. 2. – С. 343–353.
43. Characteristics and origin of the mantle root beneath the Murowa diamond mine: Implications for craton and diamond formation, Australia / D. Pearson, J. Liu, C. Smith, K. Mather, M. Krebs, G. Bulanova, A. Kobussen // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits – 2018. – V. 20 – P. 403–424.
44. Pierce M.P. Forecasting vulnerability of deep extraction level excavations to draw induced cave loads, China // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – V. 11. – P. 1674–1755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.07.006
45. Sainsbury B., Kuruçuk N. Impact of intact rock properties on proneness to rock bursting // Bulletin of engineering geology and the environment. – 2020. – V. 79. – P. 1939–1946.
46. Рациональная конструкция траншейного днища для выпуска руды при отработке переходной зоны подземного рудника «Удачный» / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, К.В. Барановский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – Т. 1. – С. 106–117. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/43c/43c98ee87229713187f336ee64ec8d.pdf> (дата обращения 05.08.2022).
47. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин, И.В. Никитин, М.В. Тишков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – Т. 2. – С. 52–62. DOI: 10.15372/FTPRPI20180207
48. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines / J. Jakubec, D. Legace, B. Boggis, L. Clark, P.A. Lewis // Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. – P. 73–88.
49. The Bunder Diamond Project, India: geology, geochemistry, and age of the Saptarshi lamproite Pipes / H. Das, A.F. Kobussen, K.J. Webb, D. Phillips, R. Maas, A. Soltys, M.J. Rayner, D. Howell // Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits – 2018. – V. 20. – P. 201–222.
50. Pearson D., Giuliani A. Kimberlites: from deep earth to diamond mines // Elements. – 2019. – Т. 15. – P. 377–380.
51. Авдеев А.Н., Зотеев О.В., Сосновская Е.Л. Прогноз развития геомеханической ситуации при переходе от открытой к подземной технологии выемки крутопадающей залежи системами с обрушением горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – Т. 5-2. – С. 6–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_6.
52. Киселев В.В., Хохолов Ю.А. К вопросу возведения, эксплуатации и обеспечения подвижности породных предохранительных подушек при подземной доработке подкарьерных запасов алмазосодержащих трубок в условиях криолитозоны // Евразийское научное объединение. – 2019. – № 11-2 (57). – С. 1–4.
53. Половов Б.Д., Волков Д.В. Геотехнический мониторинг горнотехнических сооружений в системе оценки и обеспечения качества геомеханических решений // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Т. 2-58. – С. 139–160. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-139-160.
54. Pu Y., Apel D.B., Xu H. Rockburst prediction in kimberlite with unsupervised learning method and support vector classifier // Tunneling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 90. – P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.019>
55. Zubov V.P., Anisimov K.A. Substantiation of the method ensuring the safe development of the pit reserves of kimberlite ore deposits in the conditions of the Udachny mine // E3S Web of Conferences. – 2021. – P. 101–112.
56. Cherepovitsyn A., Solovyova V. Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition // A Review. Energies. – 2022. – V. 15. – P. 387–342. DOI: 10.3390/en15010387
57. Balek A., Sashourin A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: problem-solving // E3S Web of Conferences. – 2018. – 56:02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602004> (дата обращения 05.08.2022).
58. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GS // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – V. 11-3. – P. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
59. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевой части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника «Удачный» (Якутия) / А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов, А.В. Дроздов, Д.Е. Соловьев // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – С. 82–91.
60. Controls on the explosive emplacement of diamondiferous kimberlites: new insights from hypabyssal and pyroclastic units in the Diavik mine, Canada / M. Tovey, A. Giuliani, D. Phillips, S. Moss // Lithos. – 2020. – V. 360. – P. 105–110.
61. О разработке нормативов проектирования буровзрывных работ в условиях алмазодобывающих карьеров, расположенных в криолитозоне / С.Н. Жариков, В.Г. Шеменев, И.В. Зырянов, И.Ф. Бондаренко, В.И. Хон // Рациональное освоение недр. – 2017. – Т. 1. – С. 56–60.

Поступила 14.09.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

Информация об авторах

Анисимов К.А., аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

Никифоров А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.014.1

MODERN TECHNOLOGIES OF THE DEVELOPMENT OF DIAMONDIFEROUS DEPOSITS

Kirill A. Anisimov¹,
anisimov.kirill.95@list.ru

Aleksandr V. Nikiforov¹,
nikiforov_av@pers.spmi.ru

¹ St. Petersburg Mining University,
2, 21-liniya V.O., St. Petersburg, 190106, Russia.

The relevance of this work is to combine and generalize the experience of open pit and underground mining and the use of modern science-intensive technologies for the cost-effective development of diamondiferous mineral deposits in the Far North of Russia. The analysis carried out in this scientific article allows us to give an objective assessment of the mining industry development in the field of mining operations in diamondiferous mineral deposits and introduction of modern highly efficient technologies for deposits with difficult development conditions in permafrost zones.

The main aim of the research is analysis of modern science-intensive technologies for the development of diamondiferous mineral deposits located in permafrost zones.

Objects: vertical and subvertical diamondiferous ore bodies located in permafrost zones.

Methods: evaluation and analysis of the experience of conducting open and underground mining, located in permafrost zones, synthesis and generalization of materials, sources and data that are in the public domain, as well as modern highly efficient science-intensive technologies for the development of diamondiferous mineral deposits in the climatic regions of the Far North.

Results. This article identified the main problems that arise during the mining of kimberlite ore bodies located in permafrost zones. The authors presented and substantiated conclusions on the further effective use of optimal technological schemes for open and underground mining of kimberlite ore bodies, which allow ensuring high security in mining operations, additional economic efficiency and flexibility of production technology when mining kimberlite ore bodies in the Far North.

Key words:

Ore deposits, drilling and blasting, diamonds, diamond mining, underground operations, open pit operations, diamond market, BIM technologies, digitalization, kimberlite pipe, safety cushion, underground reserves.

REFERENCES

- Linde O., Geyler O., Epstein A., Rentmeesters K. The Global Diamond Industry 2020–21. *Bain & Company*, 2021. Available at: <https://www.bain.com/link/4f87f921c98d42eb934c61efa4d6c4f9.a.spx> (accessed 5 August 2022).
- Jacques J.-S., Thompson S. *Rio Tinto Interim Results 2019*. England, Rio Tinto, 2019. 54 p.
- Cleaver C. *The diamond insight report 2019*. England, De Beers UK LTD, 2019. 56 p.
- Prognoz sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na 2022 god i na planovy period 2023 i 2024 godov. Ministerstvo Ekonomicheskogo Razvitiya Rossiyskoy Federatsii. 2021* [Forecast of the socio-economic development of the Russian Federation for 2022 and for the planned period of 2023 and 2024. 2021. Ministry of Economic Development of the Russian Federation]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/file/d7f5f5dea44bd4c30d42aac04cc1fca/prognoz_sotsialno_ekonom_razvitiya_rf_2022-2024.pdf (accessed 5 August 2022).
- Ivanov V.V., Stasenko A.V. *Ezhekvartalny otchet za 2 kvartal 2021 g. AK «ALROSA» (PAO). 2021* [PJSC ALROSA quarterly report for the 2nd quarter of 2021. 2021. AK ALROSA (PJSC)]. Available at: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82-%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (accessed 5 August 2022).
- The Kimberley Process Rough Diamond Statistics*. Available at: https://kimberleyprocessstatistics.org/public_statistics (accessed 5 August 2022).
- Foley S.F., Yaxley G.M., Kjarsgaard B.A. Kimberlites from source to surface: insights from experiments. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 393–398.
- Giuliani A., Pearson D.G. Kimberlites: from deep earth to diamond mines. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 377–380.
- Gunn A.G., Dorbor J.K., Mankelov J.M., Lusty P.A.J., Deady E.A., Shaw R.A., Goodenough K.M. A review of the mineral potential of Liberia. *Ore Geology Review*, 2018, vol. 101, pp. 413–431.
- Dalton H., Giuliani A., O'Brien H., Phillips D., Hergt J., Maas R. Petrogenesis of a hybrid cluster of evolved kimberlites and ultramafic lamprophyres in the Kuusamo area, Finland. *Petrol Journal*, 2019, vol. 60, pp. 2025–2036.
- Gaudet M., Muntener C., Kopylova M., Zhuk V., Nathwani C. Geology of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada. *Mineral Petrol*, 2018, vol. 112, pp. 433–445.
- Olson D.W. *Mineral commodity summaries 2022*. Reston, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2022. 206 p.
- Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry. *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. London, CRC Press, 2021. 528 p.
- Kjarsgaard B.A., Januszczak N., Stiefenhofer J. Diamond exploration and resource evaluation of kimberlites. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 411–416.
- Smith C.B., Atkinson W.J., Tyler E.W., Hall A.E., Macdonald I. The discovery of the Argyle pipe, Western Australia: the world's first lamproite hosted diamond mine, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 49–64.
- Zubov V.P., Phuc L.Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 257, pp. 795–806.
- Grigoryeva E.E., Sentizova N.R. Vhodnye barery i perspektivy razvitiya tekhnologii blokcheyn v almaznoy industrii i Rossii [Entry barriers and prospects for the development of blockchain technology in the Russian diamond industry]. *Tsifrovaya ekonomika i industriya 4.0: tendencii 2025* [Digital Economy and Industry 4.0: Trends 2025]. St-Petersburg, Saint-Petersburg polytechnic university Publ., 2019. pp. 147–152.
- Sepelhi M., Derek B.A., Samer A., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering geology*, 2019, pp. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>

19. Lépine I., Farrow D. 3D geological modelling of the Renard kimberlite pipe, Québec, Canada: from exploration to extraction. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, pp. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00110-018-0567-x>
20. Ivanov S.S. *Godovoy otchet 2020 PAO «ALROSA». AK «ALROSA» (PAO). 2021* [Annual report 2020 of PJSC ALROSA. 2021. AK ALROSA (PJSC)]. Available at: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/2%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB2021%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%D1%8D%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> (accessed 5 August 2022).
21. Egorova I. V., Mikhailov B. K. An object method for analyzing the availability of mineral reserves on the example of Russia. *Ores and metals*, 2021, vol. 4, pp. 6–21. In Rus. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10025.
22. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F. The Yakutniproalmaz Institute is 50 years old. History and prospects. *Mining Industry*, 2010, vol. 6, no. 94, pp. 6–12. In Rus.
23. Akishev A.N., Babaskin S.L., Kozhemyakin A.A., Nikitin R.V. Development of technology for driving and forming steep slopes at the quarry. *Mining information and analytical bulletin*, 2013, vol. 12, pp. 58–64. In Rus.
24. Gendler S.G., Borisovsky I.A. Management of aerodynamic processes in the development of gold deposits by an open method. *Mining information and analytical bulletin*, 2021, vol. 2, pp. 99–107. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-99-107.
25. Aigistov M. R., Gerasimov E. N., Bondarenko I. F., Zyryanov I. V. Modern technologies in the extraction and processing of diamond-bearing raw materials. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, vol. 5-2, pp. 6–21. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_2_0_6
26. *GOST R 58148-2018. Razrabotkaalmazorudnykh mestorozhdeniy otkrytym sposobom v kriolitozone* [State Standard 58148-2018. Open pit mining of diamond ore deposits in permafrost]. Moscow, StandartInform Publ., 2018. 156 p.
27. Chaadaev A.S., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F., Status and prospects for the development of mining and processing technologies at the diamond mining enterprises of PJSC Alrosa. *Mining Industry*, 2017, vol. 2, pp. 6–13. In Rus.
28. Kholmitskiy A.V., Fomin S.I. Substantiation of blast-free technology for mining rockburst-hazardous bauxite deposits using hydraulic breakers. *Mining information and analytical bulletin*, 2022, vol. 7, pp. 40–54. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_40
29. Nikitin I.V. Optimization of stripping parameters during underground mining of underground kimberlite deposits. *Problems of subsoil use*, 2017, no. 1, pp. 21–28. In Rus.
30. Zuev B.Yu., V.P. Zubov, A.S. Fedorov. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals, Russia. *Eurasian mining*, 2019, vol. 1, pp. 8–12. In Rus.
31. Gerasimov E.N., Zyryanov I.V., Kovalenko E.G. Yakutniproalmaz Institute: results, achievements, plans. *Gorniy Zhurnal*, 2021, vol. 2, pp. 39–47. In Rus.
32. Tishkov M. Evaluation of caving as mining method for the Udachnaya underground diamond mine project. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018, pp. 835–846. DOI: 10.36487/ACG_rep/1815_66_Tishkov
33. Kovalenko A.A., Russkih I.L. Sovershenstvovanie tekhnologii otrabotki zapasov trubki "Udachnaya" s primeneniem sistem razrabotki s samoobrusheniem rudy [Improvement of the Udachnaya pipe reserves development technology using self-cave mining systems]. *V Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya. Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy* [V International Scientific and Technical Conference. Innovative geotechnologies in the development of ore and non-ore deposits]. Yekaterinburg, Ural State Mining University, 2016. pp. 69–82.
34. Sokolov I.V., Antipin Yu.G. Innovatsionnye tekhnologii podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy [Innovative technologies for underground mining of ore deposits]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrja* [International scientific and practical conference. Modern trends in the theory and practice of mining and processing of mineral and technogenic raw materials]. Yekaterinburg, JSC Uralmekhanoobr, 2019. pp. 27–31.
35. Petrova L.V., Nikolaev V.V. The choice of the optimal variant of the system with self-collapse and the form of undercut for the conditions of the «Udachnaya» pipe. *Innovation. The science. Education*, 2021 vol. 36, pp. 1451–1460. In Rus.
36. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Gobov N.V., Nikitin I.V. Experience in the development of innovative underground geotechnologies for the development of ore deposits. *Mining information and analytical bulletin*, 2020, vol. 3-1, pp. 338–350. In Rus.
37. Zubov V.P., Antonov A.A. An example of the implementation of a combined mining system with ore self-caving in a rich iron ore area. *Notes of the Mining Institute*, 2006, vol. 168, pp. 211–214. In Rus.
38. Sainsbury B. A sub-level caving algorithm for large-scale, small-strain, numerical simulations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, vol. 52, pp. 289–295.
39. Shellsell K.J., Labrecque P.O., Morrison D.M. Increasing productive capacity in block caving mines. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018. pp. 107–115. DOI: https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_05_Morrison
40. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V. Principles of formation and criterion for evaluating the geotechnological strategy for the development of transitional zones of ore deposits by an underground method. *Mining information and analytical bulletin*, 2017, vol. 9, pp. 151–160. In Rus.
41. Roffey S., Rayner M.J., Davy A.T., Platell R.W. Evaluation of the AK1 diamond deposit, Western Australia, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 65–88.
42. Montyanova A.N., Efimov A.I., Talantsev L.R. On the issue of optimizing the technology of stowing operations during combine breaking of ore from primary diamond deposits. *Mining information and analytical bulletin*, 2010, vol. 2, pp. 343–353. In Rus.
43. Pearson D., Liu J., Smith C., Mather K., Krebs M., Bulanova G., Kobussen A. Characteristics and origin of the mantle root beneath the Murowa diamond mine: Implications for craton and diamond formation, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 403–424.
44. Pierce M.P. Forecasting vulnerability of deep extraction level excavations to draw induced cave loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 11, pp. 1674–1755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.07.006>
45. Sainsbury B., Kurucuk N. Impact of intact rock properties on proneness to rockbursting. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2020, vol. 79, pp. 1939–1946.
46. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovsky K.V. Rational design of the trench bottom for the release of ore during the development of the transition zone of the underground mine "Udachny". *Physical and technical problems of mineral development*, 2013, vol.1, pp. 106–117. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/43c/43c98ee87229713187f336ee64ec8d.pdf> (accessed 5 August 2022).
47. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Tishkov M.V. Justification of the thickness of the safety cushion in the development of underground reserves of the Udachnaya pipe with caving systems. *Physical and technical problems of mineral development*, 2018, vol. 2, pp. 52–62. In Rus. DOI: 10.15372/FTPRP120180207
48. Jakubec J., Legace D., Boggis B., Clark L., Lewis P.A. Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2018, pp. 73–88.
49. Das H., Kobussen A.F., Webb K.J., Phillips D., Maas R., Soltys A., Rayner M.J., Howell D. The Bunder Diamond Project, India: Geology, geochemistry, and age of the Saptarshi lamproite Pipes, Australia. *Geoscience and exploration of the Argyle, Bunder, Diavik and Murowa diamond deposits*, 2018, vol. 20, pp. 201–222.
50. Pearson D., Giuliani A. kimberlites: from deep earth to diamond mines. *Elements*, 2019, vol. 15, pp. 377–380.

51. Avdeev A.N., Zoteyev O. V., Sosnovskaya E. L. Forecast of the development of the geomechanical situation in the transition from open to underground technology of excavation of steeply dipping deposits with rock caving systems. *Mining information and analytical bulletin*, 2021, vol. 5-2, pp. 6–15. In Rus. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_6.
52. Kiselev V.V., Khokholov Yu.A. On the issue of construction, operation and mobility of rock safety cushions during underground mining of underground diamond-bearing pipes in permafrost. *Eurasian Scientific Association*, 2019, no. 11-2 (57), pp. 1–4. In Rus.
53. Polovov B.D., Volkov D.V. Geotechnical monitoring of mining structures in the system of evaluation and quality assurance of geomechanical solutions. *News of the Ural State Mining University*, 2020, vol. 2, no. 58, pp. 139–160. In Rus. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-2-139-160.
54. Pu Y., Apel D.B., Xu H. Rockburst prediction in kimberlite with unsupervised learning method and support vector classifier. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 90, pp. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.019>
55. Zubov V.P., Anisimov K.A. Substantiation of the method ensuring the safe development of the pit reserves of kimberlite ore deposits in the conditions of the Udachny mine. *E3S Web of Conferences*, 2021, pp. 101–112.
56. Cherepovitsyn A., Solovyova V. Prospects for the development of the Russian rare-earth metal industry in view of the global energy transition. *A Review. Energies*, 2022, vol. 15, pp. 387–342. DOI: 10.3390/en15010387
57. Balek A., Sashourin A. In-situ rock mass stress-state measurements in scales of mineral deposits: problem-solving. *E3S Web of Conferences*, 2018, 56:02004. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602004> (accessed 5 August 2022).
58. Hoek E., Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 11-3, pp. 445–463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
59. Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Drozdov A.V., Solovyov D.E. Geothermal control of soils at the base of headframes and the mouth part of vertical shafts on the example of the Udachny diamond mine (Yakutia). *Earth's cryosphere*, 2017, vol. 21, pp. 82–91. In Rus.
60. Tovey M., Giuliani A., Phillips D., Moss S. Controls on the explosive emplacement of diamondiferous kimberlites: New insights from hypabyssal and pyroclastic units in the Diavik mine, Canada. *Lithos*, 2020, vol. 360, pp. 105–110.
61. Zharikov S.N., Shemenov V.G., Zyryanov I.V., Bondarenko I.F., Khon V.I. On the development of standards for the design of drilling and blasting operations in the conditions of diamond quarries located in the permafrost zone. *Rational development of subsoil*, 2017, vol. 1, pp. 56–60. In Rus.

Received: 14 September 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

Information about the authors

Kirill A. Anisimov, post-graduate student, St. Petersburg Mining University.

Aleksandr V. Nikiforov, cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.