УДК 622.275

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «УДАЧНЫЙ»**Анисимов К.А.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,
e-mail: anisimov.kirill.95@list.ru*

В представленной научной статье были подробно рассмотрены основные геомеханические проблемы при комбинированной отработке алмазосодержащих коренных месторождений кимберлитов в условиях эксплуатации подземного рудника им. Ф.Б. Андреева «Удачный». Для проведенного исследования были собраны материалы и данные различных открытых источников информации – материалов группы компаний «АЛРОСА» и опубликованных научных статей, размещённых в различных научных журналах и материалах конференций. По результатам полученных открытых материалов и данных о проведенных исследованиях по изучению геологических, технических, геомеханических и пр. параметров на рассматриваемом нами подземном руднике, был выделен ряд негативных факторов, позволяющих серьезно осложнить безопасное ведение подземных горных работ при отработке подкарьерных запасов I очереди кимберлитовых трубок и способных привести к аварийной ситуации на подземном руднике. После изучения всех основных геомеханических, горнотехнических и пр. негативных факторов, осложняющих безопасное ведение подземных горных работ, были даны различные необходимые технические рекомендации для дальнейшего безаварийного и безопасного функционирования подземного рудника им. Ф.Б. Андреева «Удачный». По результатам проведенного анализа были сделаны выводы об изменении состояния карьера и подземного пространства рудника, ряд факторов, по нашему мнению, заслуживает особого внимания. Для обеспечения дальнейшего устойчивого развития алмазного горного комплекса РФ был сформирован ряд рекомендаций, направленных на проведение актуальной научно-исследовательской деятельности в области изучения и ведения комбинированных горных работ при отработке подкарьерных запасов алмазосодержащих коренных месторождений Крайнего Севера.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, геотехнология, геомеханические параметры, подкарьерные запасы, предохранительный массив

GEOMECHANICAL PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF UNDER-PIT RESERVES OF DIAMONDIFEROUS DEPOSITS IN THE CONDITIONS OF THE UDACHNY MINE**Anisimov K.A.***Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, e-mail: anisimov.kirill.95@list.ru*

The presented scientific article examined in detail the main geomechanical problems in the combined development of diamondiferous deposits of kimberlites in the conditions of the underground mine named F. B. Andreeva «Udachny». For this study, materials and data were collected from various open sources of information – materials from the ALROSA group of companies and published scientific articles from various scientific journals and conference materials. According to the results of open materials and data on the studied geological, technical, geomechanical and other parameters at the underground mine we are considering, a number of negative factors were identified that made it possible to seriously complicate the safe conduct of underground mining while mining pit reserves of kimberlite pipes and capable of leading to an emergency in an underground mine. After studying all the main geomechanical, mining and other negative factors that complicate the safe conduct of underground mining, various necessary technical recommendations were given for the further trouble-free and safe operation of the underground mine named F. B. Andreeva «Udachny». Based on the results of the analysis, conclusions were drawn about changes in the status of the quarry and the underground space of the mine, a number of factors, in our opinion, deserve special attention. To ensure further sustainable development of the diamond mining complex of the Russia, a number of recommendations have been formulated aimed at conducting urgent research activities in the field of studying and conducting combined mining operations while mining pit reserves of diamond-bearing primary deposits of the Far North.

Keywords: kimberlite pipe, geotechnology, geomechanical parameters, pit reserves, safety cushion

Горнодобывающая промышленность в Российской Федерации занимает значимое положение – не менее 11 % ВВП России приходится на рынок добычи полезных ископаемых, являясь одной из наиболее важных отраслей развития государства. На мировом рынке добычи алмазного сырья главенствующее место занимает груп-

па компаний «АЛРОСА» – по результатам 2019 г. компания сохраняет лидирующие позиции в мире по объему добычи алмазов, обеспечивая около 25 % от мирового производства алмазного сырья. Правительством РФ в распоряжении № 2914-р от 22 декабря 2018 г. была обозначена стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Фе-

дерации до 2035 г., был дан прогноз добычи алмазного сырья с установлением прогноза добычи около 43,3 млн кг к 2025 г. Объектом исследования является кимберлитовая трубка «Удачная», на базе которой ведутся подземные горные работы с производительностью 4 млн т руды в год, что делает этот алмазный рудник наиболее производительным в РФ.

Алмазное месторождение расположено в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе, недалеко от одноименного города. Трубка прослеживается как единое рудное тело от поверхности до глубины 250 м. Ниже она разделяется на два самостоятельных рудных тела – Восточное и Западное (далее ВРТ и ЗРТ), разделенных блоком вмещающих осадочных пород верхнего кембрия (рис. 1) [1, 2].

Отработка трубки велась открытым способом, карьер «Удачный» был введен в эксплуатацию в 1971 г. и функционировал более 40 лет. Открытые горные работы были завершены в 2016 г., на момент окончания работ глубина карьера составляла 640 м. В 2014 г. введен в эксплуатацию подземный рудник «Удачный». Вскрытие запасов руды, залегающих ниже дна карьера с абсолютной отметкой –320 м, обеспечено тремя

вертикальными стволами, расположенными к югу от карьера – клетевым, вспомогательно-вентиляционным и скиповым стволами. Также с бортов карьера на отметках –170 м и –290 м были пройдены капитальные вскрывающие штольни и через наклонный съезд № 1 были сбиты с Западным и Восточным вентиляционными квершлагами на отметках –380 м [4].

Целью исследования является анализ фактического состояния и перспектив развития горных работ для обеспечения экономически эффективной и безопасной выемки запасов кимберлитовой трубки «Удачная». В данной работе проведено комплексное исследование и оценка условий ведения горных работ для дальнейшего направления ведения подземной добычи и для безопасной отработки кимберлитовой трубки «Удачная».

Материалы и методы исследования

Используемые в исследовании данные были взяты из открытых материалов группы компаний «АЛРОСА» и открытых источников информации, в том числе были проанализированы актуальные научные статьи и исследования, изучающие вопросы подземного освоения алмазоносных месторождений Крайнего Севера.

Рис. 1. Геологическое строение кимберлитовой трубки [3]

Для формирования результатов проведенного исследования был применен метод комплексного анализа, заключающийся в изучении и обобщении опыта ведения подземных горных работ на алмазоносных трубках Канады и ЮАР. Проведенный комплексный анализ позволяет сформировать группу негативных факторов, влияющих на ведение горных работ при подземной отработке кимберлитовой трубки.

Результаты исследования и их обсуждение

Отработка подземных запасов месторождения трубки «Удачная» начата с горизонта –260/–320 м ЗРТ и ВРТ. На этих горизонтах располагались прибортовые запасы, оставленные в бортах карьера. Система разработки, которая была применена для отработки этих запасов, подэтажное обрушение с торцовым выпуском руды, показала отличные результаты, обеспечив достаточный высокий объем добычи рудной массы с низкими показателями потерь и разубоживания. Более половины отбиваемой руды в бортах было обрушено на дно карьера, часть запасов была доставлена на горно-обогатительную фабрику № 12 (далее ОФ № 12) в г. Удачный. Дно карьера на отметках –320 м и –365 м также было разрушено для создания подвижной и сыпучей предохранительной подушки. Данная рудопородная предохранительная подушка является объемным и движущимся массивом с запроектированной высотой до 65 м, обеспечивая изоляцию подземных горных работ от открытого пространства карьера. Предохранительный массив будет плавно опускаться вслед за понижением уровня ведения горных работ в соответствии с запроектированной системой разработки кимберлитовой трубки [5, 6].

Для отработки запасов I очереди, расположенных ниже дна карьера до отметки –600 м, вводится в эксплуатацию высокопроизводительная система этажного принудительного обрушения с одностадийной выемкой и площадным выпуском руды (рис. 2). Данная система разработки является уникальной для алмазоносных месторождений Крайнего Севера, так как ранее подобного типа системы не применялись в таких сложных климатических условиях. Также произошло существенное изменение технологии создания предохранительного массива между открытым и подземным пространством карьера. Традиционно, при проектировании отработки алмазоносного

месторождения, дно карьера либо оставляли, формируя целик кимберлитовых пород достаточной толщины, либо же формировали закладочный искусственный массив (рудники «Айхал», «Мир», «Интернациональный»). На руднике «Удачный» была запроектирована подвижная и сыпучая рудопородная предохранительная подушка. Зачастую для месторождений Крайнего Севера традиционно применяются низкопроизводительные системы разработки с закладкой выработанного пространства. Данные системы позволяли снизить негативное климатическое влияние на подземные горные работы, снизить влияние гидрологических факторов и увеличить безопасность персонала в зонах ведения горных работ [7]. Система этажного принудительного обрушения с сыпучей предохранительной подушкой применяется в странах африканского континента (рудники «Финш», «Кимберли»), она имеет более высокую производительность – на рудниках ЮАР при внедрении данных систем разработки удавалось достигнуть производительности рудника и поддерживать на том же уровне, что и на открытых горных работах при себестоимости тонны руды гораздо меньшей, чем у систем разработки с закладкой.

На горизонтах выпуска применяются дизельные погрузочно-доставочные машины и самоходные буровые станки, на главных транспортных горизонтах планируется использовать электрическую технику, в частности с основного откаточного горизонта от м –480 м применяется ленточный конвейер, руда попадает на него с подземного дробильного комплекса. Плановый показатель добычи на 2018 г. составлял 2,7 млн т. К 2019 г. рудник должен был выйти на полную производственную мощность, обеспечив добычу 4,0 млн т руды в год, однако по состоянию на III квартал 2019 г. за год было добыто 1,84 млн т горной массы, обеспечив невыполнение плана практически в два раза [8].

Отработка кимберлитовой трубки «Удачная» крайне затруднена, климатические и горно-геологические условия сильно влияют на разработку, ниже представлены основные факторы, имеющие важное значение при эксплуатации подземного рудника:

– Кимберлитовая трубка находится в экстремальных климатических условиях Крайнего Севера, расположившись практически на отметке полярного круга. Трубка находится в районе многолетней мерзлоты.

ты с большой глубиной замерзания пород. Резко континентальный климат характеризуется большими дневными перепадами температур, что негативно влияет на устойчивость массивов горных пород [9];

– В отработываемых массивах горных пород обводнённость распространена крайне неравномерно, геологическое строение трубки и окружающих пород сформировано без естественных водоупоров, что ведёт к свободному продвижению агрессивных и высокоминерализованных рассолов, с общей минерализацией до 400 г/л [9];

– Массив горных пород, окружающих трубку, крайне нарушен, вмещающие породы и породы кимберлита имеют сеть глубоких (до 50 м) трещин и различных нарушений, располагающихся случайным образом. Зафиксированы случаи прорыва подземных вод в горные выработки за счёт пробития трещин при бурении скважин и пр. [10, 11];

– Рудные и породные массивы имеют низкую устойчивость, установлена зависимость устойчивости кимберлита от времени его контакта с рудничным воздухом – за год она резко снижается, увеличивая расходы на крепление и поддержание горных выработок [12]. Наиболее нарушен массив пустых пород в пространстве между ВРТ и ЗРТ, в нём отмечено множество нарушений и проявлений трещиноватости;

– Отдельно выделено множество зон повышенной трещиноватости, опасных ослабленных зон, обусловленных различными гидро-геомеханическими, геомеханическими и прочими факторами, зачастую для этих зон запроектированы специальные паспорта крепления и ведётся особый контроль за состоянием подземных горных выработок (по данным АК «АЛРОСА» (ПАО));

– Рудник является опасным по газовыделению, на горизонтах –260/–380 м во время горных работ зафиксированы случаи нефтегазопоявлений, которые негативно влияют на отработку месторождения [1].

Разработка кимберлитовой трубки «Удачная» является большим вызовом для российской науки, формируя определённый ряд крайне нестандартных и зачастую прогрессивных решений. Так, изначально разработкой всех проектных решений занимался институт «Якутнипроалмаз», часть работ была выполнена в Санкт-Петербурге, в ООО «Институт ГИПРОНИКЕЛЬ», научно-исследовательские работы и технические решения осуществлял «ИГД УрО РАН». Таким образом, технологические параметры отработки кимберлитовой трубки «Удачная» изучались в течение долгого времени с учётом пожелания прямого заказчика – АК «АЛРОСА» (ПАО).

Рис. 2. Элемент системы разработки этажного принудительного обрушения

Тем не менее за первые несколько лет функционирования рудника были отмечены следующие негативные факторы, которые влияют на ведение горных работ:

1. Во время проходки наклонного съезда, из-за сильной загазованности горной выработки и недостаточности проветривания, произошел взрыв метано-воздушной смеси. При дальнейшем ведении работ неоднократно были зафиксированы газопоявления в рудничной атмосфере, также наблюдались возгорания нефтепродуктов после производственного цикла буровзрывных работ (по данным регионального отделения МЧС России).

Данные негативные факторы обусловлены содержанием нефтебитумов во вмещающих породах. Их содержание на разных глубинах отработки изменяется от 0,6 до 2,35%, а ниже по разрезу (гор. –480/–1080 м) уменьшается до 0,01%. Битумы содержат по групповому анализу около 50–60% масел, 40–45% смол, а в нижних частях разреза содержание масел уменьшается до 15–20%. Нефть в районе трубки «Удачная» содержит меньше смол (30–35%) по сравнению с битумами, а содержание в ней асфальтенов не превышает 4%. Газоносность месторождения обусловлена наличием растворенных в нефтях и рассолах газов, а сами породы практически не имеют сорбционной емкости. Основными газами являются углеводородные смеси с преимущественным содержанием метана. Нефтебитумы в кимберлитах осложняют процессы обогащения рудной массы, а их наличие в горных породах сильно влияет на ведение взрывных работ в подземных условиях.

2. Наблюдались множественные вывалы горных пород, как с кровли, так и с боков выработок, особенно это характерно для рудного тела – кимберлитовые руды очень легко отслаиваются и крошатся, начиная своё разрушение в крайне короткий срок. При этом кимберлиты Восточного рудного тела отличаются по своим характеристикам от кимберлитов Западного рудного тела [10, 13].

Данные явления наблюдаются в подавляющем случае либо в рудном теле, либо в зонах повышенной трещиноватости и на контактах с рудным телом. Кимберлиты ЗРТ и ВРТ с увеличением глубины залегания меняют значения всех показателей физико-механических свойств в 1,1–6 раз. Так, средний объемный вес по блокам на верхних горизонтах месторождения (отм +300/–280 м) варьирует от 2,34–2,37 до 2,48–2,6 т/куб.

м, а на «глубоких» горизонтах (отм –280/–1080 м) – от 2,52–2,62 до 2,62–2,69 т/куб. м. Кимберлиты ЗРТ и ВРТ по прочности на одноосное сжатие относятся к слабым ($\sigma_{сж} = 10\text{--}35$ МПа) и весьма слабым ($\sigma_{сж} = 4\text{--}10$ МПа) породам. Коэффициент крепости для вмещающих пород по шкале проф. М.М. Протодяконова колеблется от 1 до 8, а для кимберлитов – от 5 до 7. Наиболее низкие значения коэффициента крепости зафиксированы в зонах дробления, реже в зонах гидротермальных изменений, а максимальные его значения соответствуют интенсивно окремненным породам.

3. При эксплуатации рудника был выявлен повышенный износ машин и оборудования, связанный с агрессивным типом рассолов, проникающих в подземные горные выработки. Отмечены случаи прорыва рассолов во внутреннее пространство рудника из-за пробития трещин или же нарушения целостности подземных полостей, заполненных ими [7, 12, 14];

Подземные воды представлены хлоридными кальциевыми рассолами со средней минерализацией 300–400 г/л. Химический состав водоносной зоны аномален: хлоридные натриевые рассолы имеют повышенное содержание натрия, сульфатов, брома. С дальнейшим понижением уровня ведения горных работ по отработке кимберлитовой трубки будет усиливаться негативное влияние водопритоков на подземный рудник.

4. С начала функционирования рудника были зафиксированы множественные нарушения техники безопасности, повлекшие за собой травмирование персонала, в том числе отмечены смертельные случаи на руднике (по данным регионального отделения МЧС России).

В промежуточный период перехода на подземное функционирование предприятия руководство УГОКа столкнулось с недостатком персонала, подготовленного для работы в подземных условиях рудника. При этом этапное принудительное обрушение с одностадийной выемкой и площадным выпуском руды является высокотехнологичной системой разработки с высокими требованиями к ведению горных работ и профессионализму персонала. Также на территории РФ среди подземных рудников нет аналогов применения этапной системы разработки с самообрушением руд.

5. Технологической схемой отработки месторождения планируется вынимать полезное ископаемое параллельно в ЗРТ и ВРТ в нисходящем порядке, плавно опу-

ская сыпучую предохранительную подушку, понижая уровень ведения горных работ, ведя работу на двух этажах горизонтов –480 м и –580 м (рис. 3). При этом, разрушенное дно карьера, образованное в рудопородную предохранительную сыпучую подушку, будет опускаться вниз, увеличивая глубину карьера, в том числе формируя и обнажая массив вмещающих пород, расположенных между Восточным и Западным рудным телом.

Массив вмещающих пород, расположенный между Восточным и Западным рудными телами, состоит из крайне нарушенных горных пород, особенно в зоне контакта. На абсолютной отметке –580 м данный массив по своему объему сопоставим с объемом обоих рудных тел, по мере углубления горных работ управлять состоянием междутрубчатого массива не представляется возможным, в карьере уже происходят активные процессы выполаживания бортов, которые постепенно опускаются на рудопородную подушку, обеспечивая в дальнейшем невозможность безопасного выхода на дно карьера и ограничивая визуальное наблюдение за плавно обнажающимся массивом.

Специалистами ИГД УрО РАН были рассчитаны параметры предохранительной подушки с учётом обрушения известных объемов бортов с известной геометрией и расположением [14]. Однако в случае неконтролируемого разрушения междутрубчатого массива невозможно дать достоверную оценку объема обрушаемой породы на предохранительную подушку,

в том числе дать достоверный прогноз высоты обрушения и места обрушения. При этом, если толщины предохранительной подушки будет недостаточно, существует реальная угроза переноса энергии удара через предохранительную подушку в подземные горные выработки, которые способны вызвать опасные деформации подземных выработок, вплоть до создания аварийной ситуации на месторождении.

Результаты выполненного анализа фактического состояния и перспектив развития горных работ в Восточном и Западном рудных телах свидетельствуют о том, что обеспечение экономически эффективной и безопасной выемки запасов кимберлитовой трубки «Удачная» является проблематичным без разработки мероприятий по исключению опасных геомеханических ситуаций, обусловленных постоянным увеличением глубины горных работ. Исходные данные для прогнозирования таких ситуаций могут быть получены при использовании метода моделирования на моделях из эквивалентных материалов масштабных геомеханических процессов в блочных породных массивах [15, 16], разработанного в Санкт-Петербургском горном университете. Данный метод позволяет, в частности, с необходимой точностью измерений изучать напряженно-деформированное состояние породного массива, расположенного между ВРТ и ЗРТ для различных стадий развития горных работ, и на этой основе принимать превентивные меры, направленные на повышение эффективности отработки рассматриваемых рудных тел.

Рис. 3. Элемент системы разработки с образованием предохранительной подушки

Заключение

Современное состояние рудника «Удачный» можно назвать устойчивым и стабильным. Предусмотренная техническим проектом производственная мощность достижима при существующей технологии ведения горных работ. Анализ горно-геологических условий отработки трубки даёт основания полагать, что необходима корректировка параметров систем разработки по мере углубления горных работ и сохранения объема добычи. Наблюдается устойчивая тенденция к ухудшению условий разработки:

– Увеличение объема поступления подземных рассолов в горные выработки непосредственно влияет на ведение горных работ, на безопасность подземных горных выработок, на состояние машин и механизмов.

– При начале выемки полезного ископаемого системой разработки с этажным обрушением начнётся процесс разрушения заездов траншей днища блоков, сложенных кимберлитом, которые будут испытывать высокие нагрузки. Открытый доступ к рудничному воздуху ускорит процессы разрушения стенок горных выработок.

– При отработке Восточного и Западного рудных тел возникнут геомеханические проблемы, связанные с ослаблением бортов карьера и с нарушением начального состояния массива пород, находящегося между рудными телами. Массив, расположенный между рудными телами, крайне нарушен, при понижении фронта горных работ и обнажении этого массива существует возможность частичной релаксации и раскрытия трещин, внезапных неконтролируемых обрушений пород на предохранительную подушку. При неконтролируемом обрушении пород массива существует возможность превышения предельной допустимой устойчивости подушки вплоть до серьезных динамических ударов по нижележащим подземным горным выработкам.

Данные факторы, влияющие на отработку кимберлитовой трубки, требуют дальнейших исследований и проведения комплекса научно-исследовательских работ. При этом особого внимания заслуживает междутрубчатый массив, требующий проведения мероприятий и натурных исследований по выявлению и предупреждению опасных неконтролируемых обрушений.

Список литературы / References

1. Краткий отчет независимых экспертов о запасах и ресурсах месторождений алмазов группы компаний

«АЛРОСА». Micon International Co Limited. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2013/11/Alrosa-Summary-Report-Final-RUS.pdf> (дата обращения: 21.03.2020).

A brief report by independent experts on the reserves and resources of diamond deposits of the group of companies «ALROSA». Micon International Co Limited, 2018. [Electronic resource]. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2013/11/Alrosa-Summary-Report-Final-RUS.pdf> (date of access: 21.03.2020) (in Russian).

2. Дроздов А.В. Горно-геологические особенности глубоких горизонтов трубки Удачной // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 2. С. 153–165.

Drozov A.V. Mining and geological features of the deep horizons of the Udachnaya pipe // Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten. 2011. № 2. P. 153–165 (in Russian).

3. Костровицкий С.И. Что такое кимберлиты? // Материалы VI международной школы по наукам о Земле ISES-2010 (г. Одесса, Украина, 03–08 сентября 2010 г.). Одесса: Изд. I.S.E.S., 2010. С. 77–79.

Kostrovitsky S.I. What is kimberlites? // Materiali VI mezhdunarodnoy shkoly po naukam o Zemle ISES-2010 (g. Odessa, Ukraine, 03–08 sentyabrya 2010). Odessa: Izd. I.S.E.S., 2010. P. 77–81 (in Russian).

4. Никитин И.В. Оптимизация параметров вскрытия при подземной разработке подкарьерных запасов кимберлитового месторождения // Проблемы недропользования. 2017. № 1. С. 21–28.

Nikitin I.V. Optimization of opening parameters during underground mining of open-pit reserves of a kimberlite deposit // Problemi nedropolzovaniya. 2017. № 1. P. 21–28 (in Russian).

5. Дроздов А.В. Горно-геологические и технологические проблемы при строительстве подземного рудника «Удачный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 125–131.

Drozov A.V. Mining, geological and technological problems in the construction of the Udachny underground mine // Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten. 2015. № 2. P. 125–131 (in Russian).

6. Пивень Г.Ф. Технологии отработки подкарьерных запасов трубки «Удачная» // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 359–361.

Piven' G.F. Technologies for the development of sub-quarry reserves of the Udachnaya pipe // Zapiski Gornogo instituta. 2011. V. 189. P. 359–361 (in Russian).

7. Коваленко А.А., Тишков М.В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 117–128.

Kovalenko A.A., Tishkov M.V. Assessment of the underground method of mining the Udachnaya pipe field using a self-collapsing system // Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten. 2017. № 4. P. 117–128 (in Russian).

8. Ежеквартальный отчет АК «АЛРОСА» (ПАО) за 3 квартал 2019 г. // АК «АЛРОСА» (ПАО). 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2019/11/3-квартал-2019-года.pdf> (дата обращения: 21.03.2020).

The quarterly report of ALROSA PJSC for the 3rd quarter of 2019 // ALROSA PJSC. 2019. [Electronic resource]. URL: <http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2019/11/3-квартал-2019-года.pdf> (date of access: 21.03.2020) (in Russian).

9. Балек А.Е., Сашурин А.Д. Проблема оценки природного напряженно-деформированного состояния горного массива при освоении недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. S21. С. 9–23.

Balek A.E., Sashurin A.D. The problem of assessing the natural stress-strain state of a rock mass during subsurface development // Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. S21. P. 9–23 (in Russian).

10. Балек А.Е., Ефремов Е.Ю. Обоснование геомеханических условий подземной разработки алмазного месторож-

дения «Трубка Удачная» // Инновационные геотехнологии при разработке рудных месторождений. V Международная научно-техническая конференция. Екатеринбург, 2016. С. 173–174.

Balek A.E., Efremov E.Yu. Justification of the geomechanical conditions of the underground mining of the diamond pipe «Udachnaya pipe» // *Innovacionnie geoteknologii pri razrabotke rudnih mestorozheniy*. V Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Yekaterinburg, 2016. P. 173–176 (in Russian).

11. Коваленко. А.А., Тишков М.В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 134–145.

Kovalenko A.A., Tishkov M.V. The Evaluation of the Udachnaya Pipe Deposit Underground Mining Using Caving System // *Gorniy informacionno-analiticheskiy byulleten*. 2017. № 12. P. 134–145 (in Russian).

12. Бокий И.Б., Зотеев О.В., Пуль В.В. Анализ процесса оседаний породной подушки при отработке запасов западного рудного тела трубки «Удачная» по системе с обрушением // Горный журнал. 2019. № 2. С. 43–47. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.08.

Bokiy I.B., Zoteev O.V., Pul V.V. Analysis of the process of subsidence of the rock pillow during mining of the western ore body of the Udachnaya pipe using a collapse system // *Gorniy zhurnal*. 2019. № 2. P. 43–47 (in Russian).

13. Дроздов А.В. Геотехнологические проблемы освоения глубоких горизонтов трубки Удачной // Проблемы недропользования: вопросы комплексного освоения глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых.

III Всероссийская молодежная научно-практическая конференция. Екатеринбург, 2009. С. 110–121.

Drozdoz A.V. Geotechnological problems of developing the deep horizons of the Udachnaya pipe // *Problemi nedropolzovaniya: voprosi kompleksnogo osvoeniya glubokozalegayushih mestorozheniy poleznh iskopaemih*. III Vserossiyskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Yekaterinturg, 2009. P. 110–121 (in Russian).

14. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Тишков М.В. Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 52–62. DOI: 10.15372/FTPRPI20180207.

Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Tishkov M.V. Substantiation of Protective Cushion Thickness in Mining under Open Pit Bottom with the Caving Methods at Udachnaya Pipe. *Journal of Mining Science*. 2018. T. 54. № 2. P. 226–236. DOI: 10.1134/S1062739118023582.

15. Зуев Б.Ю., 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. № 1. P. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02.

16. Зуев Б.Ю., Zubov V.P., Smychnik A.D. Определение статических и динамических напряжений в физических моделях слоистых и блочных горных массивов // Горный журнал. 2019. № 7. С. 61–66.

Zuev B.Yu., Zubov V.P., Smychnik A.D. Determination of static and dynamic stresses in physical models of layered and block massifs // *Gorniy zhurnal*. 2019. № 7. P. 61–66 (in Russian).