УДК
622.274.54

А.А. Коваленко, М.В. Тишков

ОЦЕНКА ПОДЗЕМНОГО СПОСОБА ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРУБКИ «УДАЧНАЯ» С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ С САМООБРУШЕНИЕМ

Расчетным методом определена величина гидравлического радиуса, обеспечивающего развитие процесса самообрушения. Для создания необходимой площади обнажения рассмотрено два варианта подсечки массива кимберлитовой руды трубки «Удачная» с различными конфигурациями и конструктивными элементами. В первом варианте предлагается к использованию вариант с одним подсечным горизонтом, во втором – с двумя подсечными горизонтами, помимо основного горизонта подсечки предусматривается дополнительный горизонт верхней подсечки. Определены порядок отработки Восточного и Западного рудных тел месторождения, схемы расположения выпускных выработок и расстояния между ними, удельный объем подготовительно-нарезных работ, количество добываемой из блока рудной массы.
Ключевые слова: кимберлит, гидравлический радиус, подсечка, самообрушение, выпуск, свод, давление.

Обоснование технологии горных работ и выбор системы разработки для месторождений со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями (наличие водоносных горизонтов, перемежаемость пород с резко меняющимися физико-механическими и прочностными свойствами, невысокая крепость руды при водопроявлениях, трещиноватость, газонасыщенность, нефтебитумопроявления) относятся к одной из самых сложных научных и инженерных задач.

Исследование и обоснование систем разработки для подземной разработки трубки «Удачная» выполнялись многими ведущими проектными и научно-исследовательскими институтами горной промышленности России, такими как ГоИ КНЦ РАН, НИТУ «МИСиС», ИГД СО РАН, ОАО Институт «Гипроникель», ИГД УрО РАН и ОАО «Уралмеханобр».

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 117–128.
© 2017. А.А. Коваленко, М.В. Тишков.

В соответствии с принятыми проектными решениями отработка месторождения осуществляется системой с принудительным обрушением: прибортовые запасы в отм.-265/-320 м – с торцевым выпуском руды, остальная часть блока № 1 в отм. -320/-365 м – с одностадийной выемкой и площадным выпуском.

В настоящее время в мире нет действующих аналогов рудников, отрабатывающих запасы алмазоносных кимберлитовых трубок в столь сложных климатических условиях криолитозоны системами с обрушением. Существующие рудники, в частности рудник «Diavik», разрабатывающие кимберлитовые трубки в сходных климатических и горно-геологических условиях, ведут подготовку, либо уже отрабатывают запасы, отнесенные к подземной отработке системами с твердеющей закладкой: слоевыми и камерными системами разработки. Значительный объем добываемой подземным способом кимберлитовой руды на рудниках Южной Африки и Австралии («Premier», «Finsch», «Argyle») осуществляется с применением систем подэтажного и этажного обрушения. При этом из-за слабой устойчивости как руды, так и вмещающих пород, а также вследствие влияния фильтрационных вод отработка данных запасов также ведется в достаточно сложных горно-геологических условиях. При выборе основного варианта системы разработки с обрушением для отработки запасов, на большинстве рудников предпочтение отдают системам блокового самообрушения.

В течение 2014–2015 гг. специалистами института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО) были выполнены работы по обоснованию возможности отработки запасов эксплуатационного блока № 2 (ЭБ № 2 в отм. -365/-465 м) месторождения трубки «Удачная» с применением системы с блоковым самообрушением. При этом установлено, что обрушение блока или панели инициируется образованием нижней подсечки до тех пор, пока гидравлический радиус не достигнет или превысит критическое значение. С началом процесса отгрузки из критической области подсечки вышерасположенный массив руды начнет обрушаться в созданную таким образом пустоту.

Вертикальное развитие обрушения впоследствии будет осуществляться в увязке с постоянной отгрузкой обрушенной руды через действующие пункты выпуска. Горизонтальное развитие обрушения будет проходить при введении в эксплуатацию как можно большего числа пунктов отгрузки, расположенных под зоной подсечки.

Опыт горных работ на ряде рудников показывает, что создание подсечки вносит основной вклад в успех блокового самообрушения. Управление процессом подсечки оказывает подавляющее влияние на производительность и себестоимость производства. Особое внимание следует уделить тому факту, что подсечка вызывает повышенное опорное давление во вмещающих породах и в выработках горизонта откатки, которое в свою очередь может способствовать задержке в добыче и приводить к избыточным затратам по поддержанию выработок. При формировании подсечного пространства необходимо обеспечить:

- создание обнажения достаточных размеров для инициирования процесса самообрушения;
- достижение требуемых размеров подсечки для начала обрушения с минимальным нарушением вмещающих пород;
- развитие подсечки по временному фактору до параметров гидравлического радиуса обрушения, инициирование обрушения, распространение обрушения с одновременным снижением опорного давления в районе подсечки.

Успешная реализация создания подсечки и существующая практика самообрушения на рудниках требует особого внимания к нескольким факторам, включающим в себя:

- порядок подготовки горизонтов подсечки и выпуска;
- относительное расположение и расстояние между фронтом подсечки и фронтом подготовки горизонта выпуска, непосредственно фронт выпуска;
- начальная точка и направление развития подсечки;
- скорость развития подсечки;
- высота подсечки;
- геометрические параметры – форма подсечки в плане и в разрезе.

Несмотря на то, что подсечка является основным средством инициализации обрушения, могут потребоваться дополнительные мероприятия для инициирования и поддерживания обрушения при создании свободных поверхностей и последующей помощи в инициации обрушения путем формирования дополнительных отрезных щелей. Для определения возможности применения системы с самообрушением были изучены необходимые условия развития процесса самообрушения кимберлитовых руд на трубке «Удачная» за счет формирования подсечки различной конфигурации.

Разработанные на настоящий момент методики оценки условий развития процесса самообрушения (Лобшир, Мэтьюз-Пот-

вин, Мавдеслей) основаны на рейтинговой оценке массива и определении необходимой величины гидравлического радиуса, определяемого площадью и формой подсечки. Оценка устойчивости обнажения (возможности развития самообрушения) производится по диаграмме, построенной по опытным данным из практики работы рудников всего мира. Под гидравлическим радиусом *HR* (Hydraulic Radius) понимается отношение площади обнажения висячего бока (или кровли) к его периметру. Если камера оформлена наклонной по падению рудного тела, то самым опасным ее элементом является обнажение висячего бока (рис. 1). В этом случае в расчете *HR* используют пролеты камер по падению – *h* и по простиранию – *w*.

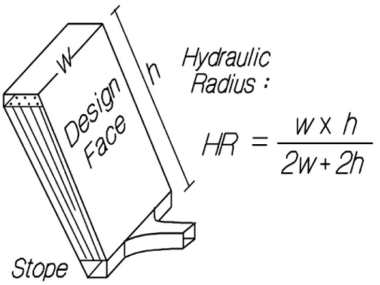

Рис. 1. Схема к расчету гидравлического радиуса HR

За последние десять лет база практических данных об условиях обрушения руд средней и высокой крепости и устойчивости интенсивно пополнялась. При пополнении базы данных корректируются критерии перехода толщи пород из устойчивого состояния в неустойчивое (с образованием свода обрушения) и полного обрушения подработанной толщи с посадкой до земной поверхности с ликвидацией всех зависаний.

Для условий месторождения трубки «Удачная», с учетом требований надежности, величина гидравлического радиуса составила 18 м. Результаты расчетов гидравлического радиуса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов гидравлического радиуса

№	Методика расчета	Величина гидравлического радиуса HR, м
1	Мэтьюз – Потвин	13
2	Мавдеслей	11
3	Лобшир	16

Таблица 2

Допустимые соотношения сторон горизонтальной подсечки

Ширина, м	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Длина, м	360	180	129	104	90	81	74	69	65

На основании анализа влияния геометрических форм и физических размеров подсечки для обоснования диапазона изменения гидравлического радиуса обрушения были определены допустимые соотношения сторон подсечки в условиях трубки «Удачная», табл. 2.

Размеры подсечки прямоугольной формы с размерами сторон a и b рассчитаны исходя из величины гидравлического радиуса HR по следующей зависимости:

$$HR = \frac{a \cdot b}{2a + 2b} \Rightarrow a = \frac{2b \cdot HR}{b - 2 \cdot HR}. \quad (1)$$

Высота ЭБ № 2 определена существующим шагом вскрытия и равна 100 м в соответствии с принятыми проектными решениями. Оптимальная высота блока определяется исходя из прогнозируемого времени службы пунктов выпуска и предполагаемых затрат на перекрепление выпускных выработок. В условиях трубки «Удачная» существует и дополнительный фактор: на определенном этапе будет вестись одновременная отработка запасов двух этажей. При этом минимально допустимое расстояние между фронтами определяется углом разрывов или, на этапе создания подсечки, безопасной глубиной ведения работ.

Система разработки этажного самообрушения при выемке запасов этажа высотой 100 м включает в себя две условные стадии очистной выемки:

- начальная стадия;
- нормальная стадия.

Начальная стадия очистной выемки в этаже включает в себя формирование выпускных камер одновременно в двух смежных панелях на Восточном рудном теле (ВРТ), на Западном рудном теле (ЗРТ) оформление выпускных камер производится после образования подсечки. Над выпускными камерами начинается формирование общей подсечки путем отбойки комплектов скважин, пробуренных с горизонта -445 (-450) м на компенсационное пространство выпускных камер. По мере увеличения площади подсечки до расчетной величины (5200 м^2 и более) в первоочередном блоке начинается процесс самообрушения кимберлита.

В дальнейшем производится нормальная стадия выемки руды в этаже путем подключения в отработку смежных панелей и элементарных блоков расходящимися фронтами в направлении от первоочередного счетверенного блока к краям рудного тела. Площадь подсечки по мере подключения в отработку запасов соседних панелей будет значительно превышать минимально

необходимые для активизации самообрушения 5200 м². В процессе самообрушения через оформленные выпускные камеры производится выпуск обрушенной руды с соблюдением необходимой планограммы в параметрах, необходимых для обеспечения безопасности. Отгрузка отбитой руды осуществляется через выпускную камеру и погрузочные заезды на горизонте -465 м с помощью погрузочно-доставочных машин (ПДМ).

Для выемки запасов месторождения были рассмотрены два варианта (основной и альтернативный) системы этажного блокового самообрушения. Данные варианты отличаются друг от друга схемами подготовки днища блоков, различными трассировками транспортных, доставочных, подсечных и буровых выработок, но общая схема выемки запасов и система разработки остаются неизменными.

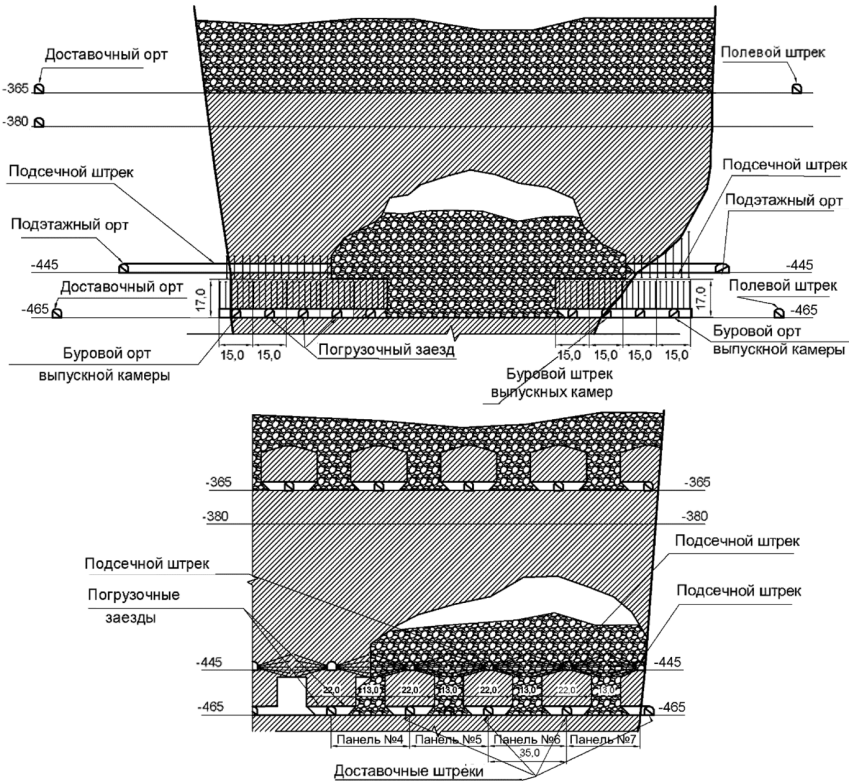

Рис. 2. Вертикальный разрез по простиранию и вкрест рудного тела с одним подсечным горизонтом

В качестве основного варианта была рассмотрена классическая система самообрушения с одним подсечным горизонтом на отм. -445 м (рис. 2), а также альтернативный вариант системы, который предполагает двойную подсечку, т.е. помимо основного горизонта подсечки предусматривается дополнительный горизонт верхней подсечки. Разработанные варианты отличаются друг от друга удельным объемом ПНР, различными затратами на проведение и поддержание выработок, различными схемами расположения выпускных пунктов и расстояниями между ними, количеством добываемой из блока рудной массы, потерями руды между точками выпуска.

Конструкция варианта системы разработки с двойной подсечкой подчинена основной идее – снижению риска зависания рудного массива в блоке на стадии начала горных работ. С помощью взрывания скважин верхнего подсечного горизонта производится дополнительное дробление руды в нижней части блока. Несмотря на дополнительные расходы на подготовку горного производства, это позволяет скомпенсировать повышенный выход негабарита на начальной стадии развития процесса самообрушения, а также исключить возможные перебои в добыче на руднике.

Направление отработки запасов панелей – расходящимися фронтами к флангам рудного тела. По мере продвижения (расхождения) фронтов горных работ в двух первоочередных панелях в очистную выемку включаются соседние панели.

Общая схема подготовительных работ на горизонтах включает следующие операции:

- на горизонте -465 м проходятся магистральные орты, кольцевые и доставочные штреки, погрузочные заезды;
- доставочные штреки на горизонте -465 м проходятся через каждые 40(35) м по границам панелей;
- между доставочными штреками проходятся погрузочные заезды;
- над погрузочными заездами на стадии очистных работ оформляются выпускные пункты;
- подсечной горизонт располагается на отм. -445(-450) м. Буровые (подсечные) штреки проходятся вдоль панелей.

Очистные работы в панели при данном варианте системы разработки начинаются с оформления верхней подсечки блока. Для этого по центру каждой панели проходятся выработки верхнего подсечного горизонта. С использованием данных выработок осуществляются разбуривание, отбойка и частичный

выпуск отбитой руды. Первоначально отбойка вееров верхней подсечки блока осуществляется на отрезную щель (отрезная щель оформляется одна на панель), а затем – «в зажиме» на ранее отбитую руду.

Основные параметры рассматриваемого варианта системы с двойной подсечкой зубчатой формы принимаются следующие:

- погрузочные заезды к выпускным камерам – диагональные;
- расстояние между доставочными штреками – 35 м;
- расстояние между погрузочными заездами и выпускными камерами – 15 м;
- размеры элементарного блока панели в плане 15×35 м, площадь – 525 м^2;
- расположение нижнего подсечного горизонта – на отм. -450 м.

Главное и принципиальное отличие такого варианта заключается в том, что для снижения концентрации горного давления в элементах днища блока оформление выпускных камер про-

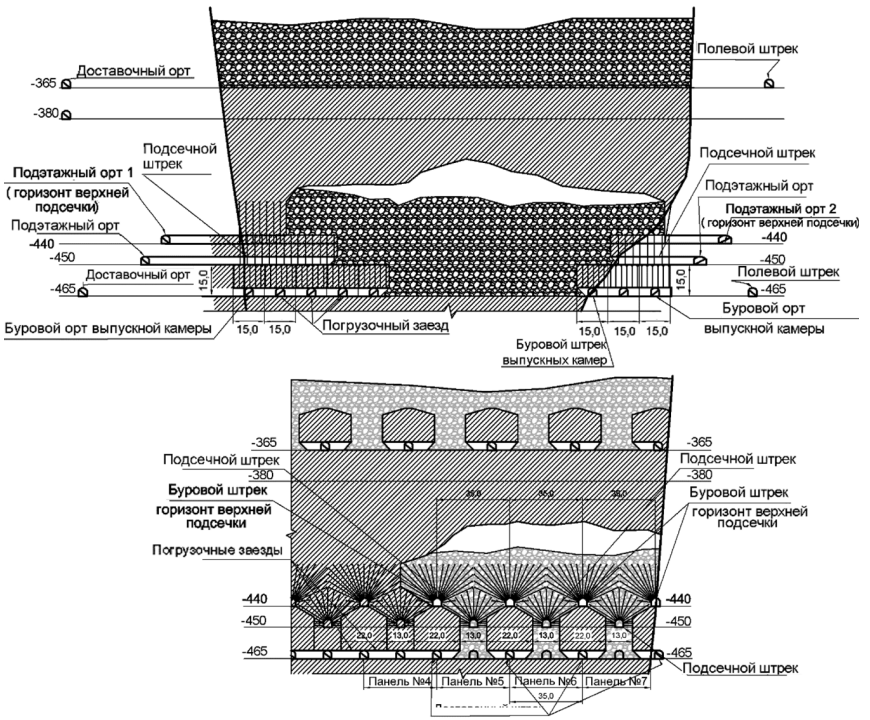

Рис. 3. Вертикальный разрез по простиранию и вкрест рудного тела с двумя подсечными горизонтами

изводится после нижней и верхней подсечек блока. Для качественной подсечки блока и максимально полного выпуска рудной массы из блока на всех стадиях отработки запасов изменена конструкция нижней подсечки. Применена так называемая «зубчатая» нижняя подсечка блока веерами скважин, разбуриваемых с горизонта нижней подсечки. С учетом уже оформленной верхней подсечки данная конструкция нижней подсечки максимально упрощает процесс выпуска рудной массы на начальном этапе отработки блока, сокращается выход негабаритов.

Схема подготовки элементарного выемочного блока и панели в целом при данном варианте представлена на рис. 3.

К достоинствам варианта с двойной зубчатой подсечки относятся:

- наибольший объем добычи руды в блоке;
- минимальные потери руды между точками выпуска (эллипсоидами выпуска);
- минимальные риски, связанные с зависанием рудной массы на начальном этапе отработки блока (при начале активизации процесса самообрушения);
- минимальный выход негабаритов.

Из недостатков варианта следует отметить:

- наибольший объем ПНР;
- диагональные заезды к выпускным пунктам под углом 60–70° к доставочной выработке увеличивают концентрацию напряжений на остроугольных участках сопряжений заездов и погрузочного штрека;
- высокая изрезанность днища увеличивает риски влияния горного давления на устойчивость элементов системы разработки (надштрековых целиков);
- высокие затраты на крепление и поддержание доставочных штреков и выпускных выработок;
- для ограничения влияния горного давления на надштрековые целики выпускные камеры могут оформляться только после подсечки блока;
- по сравнению с основным вариантом требуются проходка и поддержание дополнительного подсечного горизонта, из-за чего осложняется логистика доставки рудной массы при частичном выпуске на горизонте верхней подсечки;
- увеличенный объем буровых работ для подсечки блока.

Расчет производительности по вариантам системы блокового самообрушения и сравнительных характеристик представлен в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная характеристика вариантов системы блокового самообрушения

Наименование оказателя	Ед. изм.	Варианты систем разработки	
		основной вариант с одинарной подсечкой	альтернативный вариант с двойной подсечкой
Потери	%	9,3	7,3
Разубоживание	%	15	15
Всего уд. объем ПНР на 1000 т, в т.ч.:	$м^3$/1000 т	15,3	19,3
по руде	$м^3$/1000 т	10,7	13,5
по породе	$м^3$/1000 т	4,6	5,8
Выход руды с 1 м скважин	т/м	148	40,9
Годовая производительность рудника	млн т/год	до 6	до 7

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что варианты систем с двойной подсечкой позволяют добывать больший объем руды за счет возможности дополнительной отгрузки части отбитой руды из верхней подсечки.

Из опыта ведения очистных работ на месторождениях с применением систем блокового самообрушения следует, что в случае формирования фронта нижней подсечки до начала создания выпускных камер возможно переуплотнение руды и последующее ее зависание при выпуске. В вариантах системы разработки блокового самообрушения с двойной подсечкой образование на первом этапе верхней подсечки позволит образовывать камеры выпуска до подхода фронта нижней подсечки за счет формирования зоны разгрузки над горизонтом выпуска. Таким образом, будет обеспечиваться устойчивость надштрековых целиков и нормальная инициация самообрушения.

Поэтому применение варианта системы блокового самообрушения с двойной подсечкой на начальном этапе развития очистных работ в ВРТ и ЗРТ более целесообразно. Несмотря на более высокие затраты на проходку и поддержание выработок горизонта выпуска и подсечки, преимущество данного варианта заключается в минимальных потерях руды и максимальных объемах добычи руды в этаже.

Таким образом, предложенный для отработки запасов рудника «Удачный» в этаже -365 м/465 м системой блокового самооб-

рушения вариант с двойной подсечкой при расстоянии между доставочными штреками 35 м и расстоянии между погрузочными заездами в 15 м является оптимальным для отработки обоих рудных тел.

Для промышленного внедрения рассматриваемой системы планируется в ближайшее время провести опытно-промышленные испытания в блоке № 1 ограничившись созданием двух или трех элементарных блоков. По результатам выполнения этих работ предстоит подтвердить возможность инициации процессов самообрушения массива руды исходя из рассчитанных параметров. В случае успешного проведения опытно-промышленных работ в дальнейшем с целью сокращения объемов горно-капитальных и горно-подготовительных работ потребуется выполнить пересмотр существующих проектных решений в части увеличения высоты подлежащих к отработке блоков до 150–200 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ФНиП «Правила* безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (утв. Приказом Ростехнадзора РФ № 599 от 11.12.2013 г.).

2. *Методические* указания по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов. Внипигорцветмет. – Чита, 1988.

3. *Руководство* по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М.: Стройиздат, 1983.

4. *Бурчаков Ю. И.*, *Гнедин В. Е.*, *Денисов В. М.* Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1983. – 255 с.

5. *Бенявски З.* Управление горным давлением. – М.: Мир, 1990. – 254 с.

6. *Малофеев Д. Е.*Развитие теории и практики выпуска руды под обрушенными породами. – К.: СФУ, 2007. – 171 с.

7. *Brown E. T.* Block caving geomechanics. – Australia. – 2002. – 515 p.

8. *Caving 2010.* Proceeding of the Second Int. Symp. on Block and Sublevel Caving. ACG, Perth, 692 p.

9. *Mawdesley C.* Predicting Cave Initiation and Propagation in Block Caving Mines. PhD thesis, University of Queensland, Brisbane, 2002.

10. *Laubscher D. H.* Cave mining – state of the art, Chapter 55 in Underground Mining Methods, ed Hustrulid and Bullock, SME, 2001, pp. 455–463. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Коваленко Алексей Анатольевич[1] – главный инженер,
e-mail: KovalenkoAA@alrosa.ru,
Тишков Максим Вячеславович[1] – кандидат технических наук,
зав. лабораторией, e-mail: TishkovMV@alrosa.ru,
[1] Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО).

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 117–128.

UDC
622.274.54

A.A. Kovalenko, M.V. Tishkov

EVALUATION OF THE UDACHNAYA PIPE DEPOSIT UNDERGROUND MINING USING CAVING SYSTEM

Hydraulic radius is calculated by means of computational method. The very value provides caving. There are two options of kimberlite block undercutting of «Udachny» pipe with variety of both configurations and design elements in order to create essential outcop area.

The first option is associated with undermining horizon, the second employs two undermining horizon. Apart from usage of primary horizon there's another additional undermining horizon of upper block undercutting. The order of Eastern and Western ore bodies mining, draw points placements and distance between them, specific volume of preparatory-development operations, volume of mined ore columns are determined.

Key words: kimberlite, hydraulic radius, undercut, caving, draw, vault, pressure.

AUTHORS

Kovalenko A.A.[1], Chief Engineer, e-mail: KovalenkoAA@alrosa.ru,
Tishkov M.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: TishkovMV@alrosa.ru,
[1] Institute Yakutniproalmaz, ALROSA, PJSC,
678175, Republic Sakha (Yakutia), Mirny, Russia.

REFERENCES

1. *FNiP «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh» (utv. Prikazom Rostekhnadzora RF № 599 ot 11.12.2013 g).* (Federal rules and regulations «Safety regulations of mining operations and processing of solid minerals» (appr. by Russian Federation Rostekhnadzor Order № 599 of 11.12.2013)).

2. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu razmerov kamer i tselikov pri podzemnoy razrabotke rud tsvetnykh metallov*. Vnipigortsvetmet (Methodical guidelines for determining the size of chambers and pillars during underground mining of non-ferrous metal ores. Vnipigortsvetmet), Chita, 1988.

3. *Rukovodstvo po proektirovaniyu podzemnykh gornykh vyrabotok i raschetu krepi* (Guidelines for underground mining design and support calculation), Moscow, Stroyizdat, 1983.

4. Burchakov Yu. I., Gnedin V. E., Denisov V. M. *Stroitel'naya mekhanika* (Structural mechanics), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 255 p.

5. Benyavski Z. *Upravlenie gornym davleniem* (Rock pressure control), Moscow, Mir, 1990, 254 p.

6. Malofeev D. E. *Razvitie teorii i praktiki vypuska rudy pod obrushennymi porodami* (Development of the theory and practice of ore drawing under caved rocks), Kiev, SFU, 2007, 171 p.

7. Brown E. T. *Block caving geomechanics*. Australia. 2002. 515 p.

8. *Caving 2010. Proceeding of the Second Int. Symp. on Block and Sublevel Caving*. ACG, Perth, 692 p.

9. Mawdesley C. *Predicting Cave Initiation and Propagation in Block Caving Mines*. PhD thesis, University of Queensland, Brisbane, 2002.

10. Laubscher D. H. *Cave mining state of the art, Chapter 55 in Underground Mining Methods*, ed Hustrulid and Bullock, SME, 2001, pp. 455–463.