

На правах рукописи



КОВАЛЕНКО АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ СИСТЕМАМИ
РАЗРАБОТКИ С САМООБРУШЕНИЕМ**

Специальность

2.8.8. Геотехнология, горные машины

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Петрова Ольга Викторовна

Официальные оппоненты:

Савич Игорь Николаевич
доктор технических наук, профессор
кафедры «Геотехнологии освоения недр»
НИТУ МИСИС, г, Москва

Барановский Кирилл Васильевич
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник лаборатории подземной геотехнологии
ИГД УрО РАН,
г. Екатеринбург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»), г. Екатеринбург

Защита состоится «16» января 2024 г. в 11⁰⁰ч. на заседании диссертационного совета 24.2.624.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, зал видеоконференцсвязи (ауд.233).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Корнилов Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние подземной разработки кимберлитовых месторождений Якутии характеризуется сложностью горно-геологических и горнотехнических условий, таких как: большая глубина работ, карьерное выработанное пространство, подземные высокоминерализованные водоносные комплексы и криолитозона, состоящая из многолетнемерзлых, мерзлых пород, имеющих существенное различие физико-механических свойств. В ухудшающихся горно-геологических условиях разработки, наряду со снижением содержания полезных компонентов с глубиной ведения горных работ, горные предприятия проявляют всё больший интерес к высокопроизводительным системам разработки с самообрушением, характеризующимся операционными затратами, сопоставимыми с издержками открытых горных работ.

Системы разработки с самообрушением широко и эффективно применяются в различных горно-геологических условиях, однако отсутствие опыта применения непосредственно в условиях кимберлитовых месторождений Якутии, характеризующихся весьма сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями, обуславливающими высокий уровень геотехнического риска, сдерживает их внедрение. Поэтому, обоснование параметров системы разработки с самообрушением с учетом существующего геотехнического риска для условий отработки кимберлитовых месторождений Якутии представляет актуальную научную задачу.

В связи с этим **целью работы** является обоснование параметров технологии освоения кимберлитовых месторождений Якутии высокопроизводительными и эффективными системами разработки с самообрушением.

Идея работы заключается в том, что эффективное и безопасное освоение кимберлитовых месторождений Якутии достигается применением систем разработки с самообрушением, параметры которых определяются с учётом геотехнического риска.

Объект исследования – технология освоения кимберлитовых месторождений подземным способом.

Предмет исследования – параметры системы разработки с самообрушением.

Задачи исследований:

-анализ и обобщение современного опыта отработки кимберлитовых месторождений системами разработки с самообрушением;

-анализ существующих методов расчета параметров систем разработки с самообрушением и учета геотехнических рисков;

-разработка технологических схем освоения кимберлитовых месторождений системами с самообрушением;

-идентификация факторов геотехнического риска и определение его структуры при системах с самообрушением;

-разработка методики определения параметров системы разработки с самообрушением и оценки геотехнического риска;

-разработка рекомендаций по использованию систем разработки с самообрушением для освоения кимберлитовых месторождений Якутии и их технико-экономическая оценка.

Методы исследований. В работе использован комплексный метод, включающий анализ и обобщение достижений науки, техники и практики проектирования и эксплуатации рудных месторождений подземным способом, результатов отечественных и зарубежных исследований; аналитические и технико-экономические расчеты с обработкой данных методами математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Безопасное и эффективное освоение запасов кимберлитовых месторождений Якутии, характеризующихся сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями при снижении качества полезного ископаемого с глубиной залегания рудных тел, обеспечивается использованием систем разработки с самообрушением, параметры которых обоснованы с учетом геотехнического риска, и комплекса мероприятий, компенсирующих отрицательное воздействие негативных факторов.

2. Предотвращение негативного влияния гидрогеологических, геомеханических и газодинамических факторов, активация процессов самообрушения и оперативное управление фрагментацией горного массива достигаются использованием гидроразрыва в сочетании с методами заблаговременной дегазации и дренажа.

3. Величина гидравлического радиуса и площадь подсечки, обеспечивающих самообрушение руд и пород с вероятностью геотехнического риска не более 60%, определяются надежностью исходных данных: степень трещиноватости, прочность руд и пород на сжатие, напряженное состояние массива - 50% и выше при любой изменчивости свойств горного массива кимберлитовых трубок Якутии.

4. Методы управления геотехническим риском при применении систем разработки с самообрушением определяются уровнем возможных последствий: при низком уровне последствий допустимый риск достигается при надежности исходных данных о трещиноватости массива не менее 50% вне зависимости от их изменчивости; при среднем уровне последствий – повышением надежности исходных данных до 70 % и более, либо введением коэффициента запаса площади подсечки, равного 1,1-1,3; при высоком уровне последствий – проведением заблаговременной предподготовки массива с целью увеличения его трещиноватости в 1,5-2 раза.

Достоверность научных положений, выводов и результатов обеспечивается сопоставлением полученных результатов с данными мирового опыта эксплуатации алмазонасных месторождений; представительностью и надежностью исходных данных; использованием современных вероятностных методов математической статистики; подтверждается сопоставимостью данных аналитических расчетов с технико-экономическими показателями работы предприятий; положительными результатами апробации рекомендаций диссертации в промышленности.

Научная новизна:

1. Систематизации геотехнических рисков и методов их управления, учитывающие специфику горно-геологических условий кимберлитовых месторождений, технологических процессов и их стадийность, позволяющих идентифицировать риски по факторам и источникам с прогнозом опасностей и последствий на каждом этапе жизненного цикла технологии освоения кимберлитовых трубок Якутии системами

разработки с самообрушением и разрабатывать своевременные меры по управлению рисками.

2. Эмпирические зависимости, в виде уравнений множественной регрессии, гидравлического радиуса для руд и пород кимберлитовых месторождений Якутии от основных влияющих факторов при использовании систем разработки с самообрушением и варьировании в диапазонах ($\pm 50 \div 75$ % от среднего значения) степени трещиноватости и уровня надежности исходных данных.

3. Динамический критерий оценки геотехнического риска при использовании систем разработки с самообрушением на кимберлитовых месторождениях Якутии, позволяющий оценить вероятность и последствия геотехнического риска на всех стадиях жизненного цикла горного производства.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследований, формулировании идеи достижения цели, разработке: конструкции системы разработки с самообрушением применительно к условиям месторождений Якутии, методики расчета ее параметров с учетом геотехнического риска, структуры геотехнических рисков, систематизации методов управления рисками, обосновании динамического критерия их оценки при системах разработки с самообрушением, установлении зависимости гидравлического радиуса для руд и пород кимберлитовых месторождений от основных влияющих факторов, а также в создании алгоритма определения параметров.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по выбору технологии и обоснованию параметров системы разработки с самообрушением с учетом геотехнического риска в условиях подземной отработки кимберлитовых месторождений Якутии для повышения эффективности и безопасности их освоения.

Реализация работы. Результаты и научно-практические рекомендации работы использованы при разработке проектных решений по отработке кимберлитовой трубки «Удачная», концепции отработки рудника «Мир Глубокий».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на семинаре кафедры РМПИ МГТУ им. Г.И. Носова (2024 г.); X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» и XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы освоения и сохранения недр» (г. Магнитогорск, МГТУ, 2019, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность» (г. Мирный, Институт «Якутнипроалмаз», 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья» (г. Екатеринбург, 2019 г.); Международных научно-технических конференциях «FarEastCon-2020» и «FarEastCon-2021» (г. Владивосток, 2021-2022 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований, изложенных на 202 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 46 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Мировой опыт подземных горных работ показывает, что более ста месторождений обрабатываются системами разработки с обрушением, при этом 62% приходится на системы разработки с самообрушением, эффективность применения которых определяется низкой себестоимостью, высокой производительностью, сопоставимой с производительностью открытых горных работ, отсутствием персонала в опасных зонах в процессе очистной выемки, что в ухудшающихся горно-геологических условиях при снижении качества полезных ископаемых с глубиной залегания рудных тел предопределяет перспективу их применения как единственную альтернативу для перехода на подземный способ доработки бедных руд кимберлитовых трубок Якутии.

Отсутствие апробированного отечественного опыта реализации процессов самообрушения и нормативной базы проектирования сдерживает их широкое промышленное внедрение в России, что, наряду с недостаточными знаниями и специфическими горно-геологическими и горнотехническими условиями разработки кимберлитовых месторождений Якутии, обуславливают высокие геотехнические риски при реализации технологий с самообрушением.

Вопросам применения систем разработки с самообрушением при подземной разработке, обоснования их параметров посвящены работы ведущих отечественных и зарубежных ученых: В.Р. Именитова, Д.Р. Каплунова, Е.В. Кузьмина, И.Н. Савича, А.Р.Узбековой, Brown E. T., Jacubec J., Laubscher D.H., Mawdesley C., Mathews K. E., Potvin Y., Summers J и других. Ими определены основные условия применения систем разработки с самообрушением и методики расчета их параметров. Вместе с тем недостаточно изучены вопросы обоснования параметров системы разработки с самообрушением с учетом существующих и характерных для данной системы разработки геотехнических рисков.

В связи с тем, что горно-геологические и горнотехнические условия отработки кимберлитовых трубок Якутии (Мир, Айхал, Интернациональный, Удачный и др.) схожи по генезису и строению, возможно использовать метод аналогии и применения идентичных технических решений, в качестве базового месторождения принята трубка Удачная.

В процессе анализа геологических и горнотехнических особенностей трубки Удачная выделены следующие:

1. Геологические, тектонические, морфологические и горнотехнические (карьер, глубиной более 600 м; два сближенных рудных тела, разделенных между собой массивом сильно нарушенных вмещающих пород горизонтальной мощностью от 140 м (гор. - 290 м) до 350 м (гор. -580 м); значительная площадь рудных тел в плане; на контактах рудных тел и вмещающих пород развиты зоны брекчирования, в рудных тела присутствуют ксенолиты вмещающих пород; возможно обнаружение каверн, карстовых полостей; сильная трещиноватость руд и вмещающих пород; низкая устойчивость руд и склонность их к выветриванию под воздействием воздуха и влаги; значительная вариация свойств руд и пород по крепости и устойчивости).

2. Флюидные (подмерзлотные высокоминерализованные газонасыщенные природные воды; газожидкостные и пульпообразные напорные скопления в карстовых

полостях; значительная площадь чаши карьера, что предопределяет возможность значительного кратковременного увеличения поступления в карьер вод в периоды снеготаяния и сильных дождей).

3. Геокриологические и климатические (значительный по продолжительности период отрицательных температур (7 месяцев); криолитозона до глубины 800м, состоящая из многолетнемерзлых, мёрзлых пород и обводненной зоны с отрицательными температурами горных пород).

В настоящее время кимберлитовая трубка Удачная отрабатывается системой разработки с принудительным обрушением, характеризующейся значительно более сложной организацией работ с увязкой проходки выработок, отбойки и выпуска руды на большом количестве горизонтов, повышенными показателями потерь и разубоживания, значительными объемами подготовительно-нарезных работ, бурения и расходом взрывчатых веществ, что обуславливает более высокие экономические издержки по сравнению с системами разработки с самообрушением.

С учетом характерных для кимберлитовых месторождений условий отработки, разработана технологическая схема освоения кимберлитовой трубки Удачная с использованием систем разработки с самообрушением (рис.1), включающая этапы:

1. Предварительная дегазация и дренаж массива посредством проведения дегазационного горизонта, предусматривающего возможность установки изолирующих перемычек в местах сбоек скважин, монтаж дегазационной установки и дегазацию массива.

2. Предподготовка массива с целью увеличения его трещиноватости и проницаемости, реализация которой также является контрольной дегазацией, заключающаяся в проходке технологического горизонта вокруг планируемого к самообрушению блока, бурении скважин вкост направления оси трещин и проведении гидроразрыва. Исследования кернового материала позволят скорректировать данные физико-механических свойств массива и соответственно повысить их надежность.

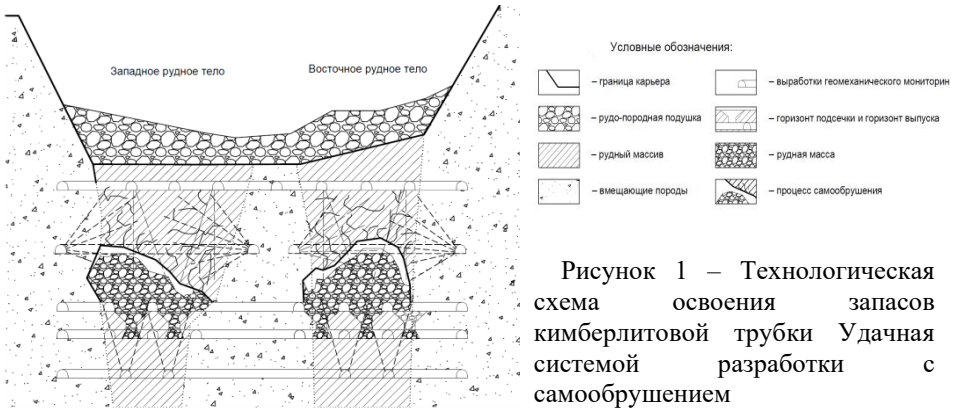
3. Формирование опережающей подсечки и оформление пунктов выпуска.

4. Фрагментация и самообрушение массива, выпуск руды.

5. Мониторинг параметров самообрушения посредством установки соответствующих датчиков на технологическом горизонте.

Эффективная реализация систем разработки с самообрушением обеспечивается обоснованием размеров блока и его конструктивных элементов, подсечки, методов предподготовки, дегазации и дренажа массива, надежность расчетных параметров которых и соответствие горно-геологическим условиям определяется корректностью и представительностью исходной горно-геологической информации.

Анализ влияния характеристик горного массива на параметры системы разработки с самообрушением показал, что определяющим свойством является его обрушаемость, т.е. способность к потере устойчивости в режиме фрагментации массива при подработке, зависящая как от естественной нарушенности, так и размеров подсечки, которая находится исходя из величины гидравлического радиуса, корректность расчета которого определяет эффективность реализации каждого этапа жизненного цикла технологии (рисунок 2).



Горно-геологические и горнотехнические условия подземной разработки кимберлитовых трубок Якутии характеризуются недостоверностью, а в некоторых случаях недостаточностью исходной информации; различием характеристик и значительным разбросом диапазонов данных рудного и породного массивов, что предопределяет геотехнические риски при реализации систем разработки с самообрушением.

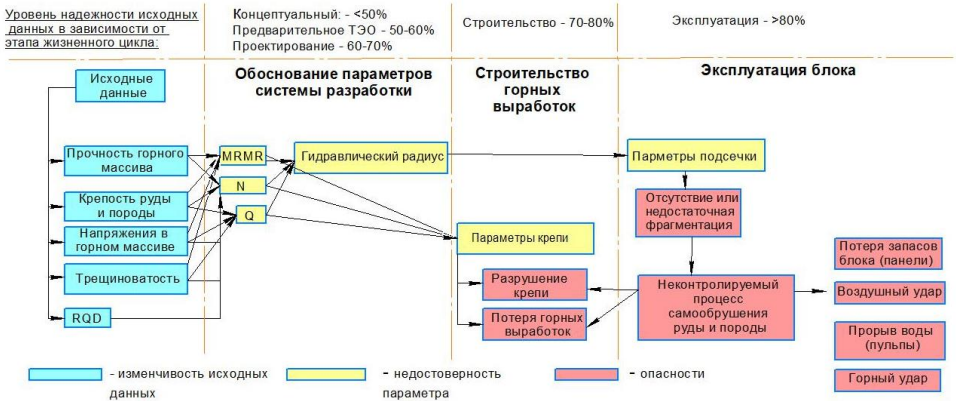


Рисунок 2 - Взаимосвязь параметров систем разработки с самообрушением с характеристиками горного массива на этапах жизненного цикла

Геотехнический риск систем разработки с самообрушением, как мера его вероятности и величины экономических и неэкономических последствий на всех этапах жизненного цикла реализации систем разработки с самообрушением, определяется состоянием горного массива, неопределенностью и разбросом данных

при процессах самообрушения, что может привести к негативным последствиям, вследствие возникновения аварий, травмирования и гибели персонала.

Разработанная структура геотехнического риска при системах разработки с самообрушением, учитывающая специфику алмазонасных месторождений (табл.1), позволяет их идентифицировать по основным факторам и источникам возникновения с учетом возможных опасностей и связанных с ними последствий на каждом этапе жизненного цикла и оперативно разработать меры по их предупреждению, либо снижению их последствий.

Таблица 1 - Структура геотехнического риска при системах разработки с самообрушением

Стадия жизненного цикла горного производства	Факторы риска	Источник риска	Опасности	Условия возникновения опасностей	
Проектирование	Методы и полнота определения исходной информации по результатам проектно-изыскательских работ. Наличие методического обеспечения расчёта параметров	Склонность руд и вмещающих пород к самообрушению	Недостовверные параметры системы разработки с самообрушением: форма и высота подсечки, параметры блока самообрушения	Использование «непроверенных» методик на основании недостаточного количества исходных данных	
Строительство	Методы и полнота корректировки горно-геологической информации и корректировки проектных решений по данным эксплуатационной разведки	Выработки подсечки, пунктов выпуска, концентрационного горизонта	Нарушение устойчивости выработок	Неконтролируемое самообрушение (или сползание) блока или большого объема налегающих пород за зоной самообрушения под влиянием силы тяжести в результате напряжений, вызванных горными работами	
		Целики		Опорное горное давление	
		Наличие выработанного карьерного пространства		Наличие разломов, разрывов	
		Наличие опасных газов	Потери выработок, приводящие к потерям запасов	Недостаточная мощность целика налегающих пород	
Эксплуатация	Параметры системы разработки с самообрушением	Фрагментация	Задержка развития самообрушения	Неконтролируемое обрушение больших блоков или объемов пород за зоной подсечки или, что более типично, за зоной самообрушения	
			Зависания руды над горизонтом выпуска		
			Воздушный удар		
	Выпуск руды	Прорыв обводненной рудной массы мелкой фракции	Наличие минералов, формирующих пульпу в зоне обрушения		
				Наличие воды	
				Иницирующие механизмы – взрывание, сейсмическое воздействие, выпуск руды	
Устойчивость горных выработок	Воздушный удар	Пустоты, через которые вода достигнет зону горных работ			
		Неконтролируемое обрушение целиков с выходом на поверхность или на зону самообрушения руды			
		Аэродинамические связи с карьерным пространством			
Консервация (ликвидация)	Состояние массива горных пород	Локализация процессов	Образование провалов, обвалов	Неконтролируемое самообрушение	
					Размеры зоны самообрушения
					Состояние земной поверхности
				Прорыв шлама	

Для своевременного реагирования на изменение свойств горного массива на всех стадиях реализации технологий с самообрушением в зависимости от изменяющихся факторов разработан динамический критерий оценки геотехнического риска при системах разработки с самообрушения на i -ой стадии жизненного цикла горного производства $P_i^{\text{геот}}$ (1):

$$\begin{cases} P_i^{\text{геот}} = \{B_i^{\text{геот}}; P_i^{\text{геот}}\}; \\ P_i^{\text{геот}} \leq P_{\text{доп}}^{\text{геот}} \end{cases} \quad (1)$$

где i – стадия реализации жизненного цикла горного производства; $B_i^{\text{геот}}$ – вероятность геотехнического риска при системах разработки с самообрушением на i -ой стадии жизненного цикла горного производства; $P_i^{\text{геот}}$ – экономические и неэкономические последствия геотехнического риска на i -ой стадии жизненного цикла горного производства; $P_{\text{доп}}^{\text{геот}}$ – допустимый геотехнический риск на i -ой стадии жизненного цикла горного производства.

$B_i^{\text{геот}}$ определяется интегральной вероятностью ошибки исходной горно-геологической информации с учетом значимости влияния физико-механических свойств массива на величину гидравлического радиуса и вероятностью отсутствия или недостаточности самообрушения массива (2).

$$\begin{cases} B_i^{\text{геот}} = B_i^{\text{исх}} + B_i^{\text{самообр}}, \\ B_i^{\text{исх}} = (K_{\text{знач}}^{\text{проч}} \cdot V_i^{\text{проч}}) + (K_{\text{знач}}^{\text{трещ}} \cdot V_i^{\text{трещ}}) + (K_{\text{знач}}^{\text{напряж}} \cdot V_i^{\text{напряж}}) \end{cases} \quad (2)$$

где $B_i^{\text{исх}}$ – вероятность ошибки исходных данных на i -ой стадии реализации жизненного цикла горного производства (определяется по модифицированной диаграмме Мавдслея путем сопоставления рассчитанной по методике Лобшера или Бартона величины гидравлического радиуса с показателем устойчивости массива N для фактических горно-геологических условий); $B_i^{\text{самообр}}$ – вероятность отсутствия или недостаточности самообрушения массива на i -ой стадии реализации жизненного цикла горного производства; $K_{\text{знач}}^{\text{проч}}$, $K_{\text{знач}}^{\text{трещ}}$, $K_{\text{знач}}^{\text{напряж}}$ – коэффициенты значимости соответственно предела прочности массива, трещиноватости и коэффициента напряженности (определяются путем аналитических расчетов оценки их влияния на величину гидравлического радиуса на основании фактических горно-геологических данных); $V_i^{\text{проч}}$, $V_i^{\text{трещ}}$, $V_i^{\text{напряж}}$ – вероятности ошибки определения соответственно предела прочности массива, трещиноватости и коэффициента напряженности на i -ой стадии реализации жизненного цикла горного производства.

Экономические и неэкономические последствия геотехнического риска при системах разработки с самообрушением (низкий, средний и высокий) в совокупности определяются величиной индивидуального риска, соблюдением требований охраны недр в части нормативов потерь и, как следствие, с дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами, простоями, связанными с ликвидацией техногенных аварий и инцидентов (таблица 2).

Оценку уровня геотехнического риска при системах разработки с самообрушением следует производить в динамике развития производственных процессов по мере уточнения горно-геологической информации в соответствии с картой геотехнических рисков, ранжированных по уровням – приемлемый, контролируемый и недопустимый (таблица 3). Уровень риска – «приемлемый и контролируемый» – соответствует допустимому уровню геотехнического риска, «контролируемый» – требует дополнительных мер управления свойствами горного массива, «недопустимый» – требует пересмотра параметров системы разработки с самообрушением или отказ от реализации данной системы разработки.

Таблица 2 - Оценка уровня возможных последствий геотехнического риска при системах разработки с самообрушением

Уровень последствий	Критерии последствий технологического риска при системах разработки с самообрушением				
	Индивидуальный риск	Экологические	Экономические потери		
			Стоимость активов	Ежегодные операционные затраты	Остановка проекта
Низкий	$< 1 \times 10^{-6}$ (для всех)	Потери ниже нормативного уровня	$\leq 1\%$	$\leq 5\%$	меньше 1 месяца
Средний	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-6}$ для работников предприятия; $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-6}$ для населения	Потери в пределах установленных нормативов	1 – 10 %	5 – 10 %	1-6 месяцев
Высокий	$\geq 1 \times 10^{-3}$ для работников предприятия; $\geq 1 \times 10^{-4}$ для населения.	Потери выше установленных нормативов	$\geq 10\%$	$\geq 10\%$	больше 6 месяцев

Таблица 3 - Карта определения уровня геотехнического риска при системах разработки с самообрушением

Вероятность геотехнического риска, %	Уровень последствий		
	Низкий	Средний	Высокий
< 50	Приемлемый	Приемлемый	Контролируемый
50 - 90	Приемлемый	Контролируемый	Недопустимый
> 90	Контролируемый	Недопустимый	Недопустимый

Эффективность систем разработки с самообрушением определяется склонностью руд к самообрушению, обусловленной свойствами массива (прочность руд, трещиноватость, напряженно-деформированное состояние массива и др.), на основе которых определяется достаточная площадь подсечки исходя из величины гидравлического радиуса (далее – HR). Основными факторами, влияющими на величину HR, являются предел прочности на сжатие, напряженное состояние и степень трещиноватости горного массива.

Традиционным подходом к расчету HR является использование либо средних значений физико-механических свойств рудного массива, либо максимальных как наиболее пессимистического сценария по известным методикам Лобшира, Метьюза и Мавдслея, что приводит к существенному различию требуемой величины HR – для условий самообрушения массива трубки Удачная от 6 м до 16 м ($\pm 45\%$ от среднего), площади подсечки от 0,5 до 3 тыс. м² и, как следствие, времени ввода блока в эксплуатацию от 10 до 60 мес. (таблица 4).

Расчеты HR показали, что для самообрушения породного массива требуется большая площадь подсечки, чем для рудного, что обуславливает высокие геотехнические риски эффективного самообрушения на контакте «руда – порода» и вмещающих пород в части возможного образования свода естественного равновесия и прекращения процесса самообрушения и, как следствие, образованию воздушных промежутков более 15 % от высоты блока, приводящего к образованию воздушных ударов (рисунок 3).

Таблица 4 – Результаты расчета горизонтальной подсечки для руд и пород кимберлитовой трубки Удачная при применении различных методик

Параметры системы разработки с самообрушением		Лобшир		Метьюза-Потвина		Мавдслей	
		руда	порода	руда	порода	руда	порода
минимум	HR	6	6,5	9	9	10	11
	Ширина подсечки, м	23	25	35	35	40	43
	Длина подсечки, м	25	27	37	37	40	45
	Площадь подсечки, м ²	575	675	1295	1295	1600	1936,8
	Объем подсечки, тыс. м ³	5,75	6,75	13	13	16	19,4
среднее	HR	11	13	10	9	11	10
	Ширина подсечки, м	43	50	40	35	43	40
	Длина подсечки, м	45	54,17	40	37	45	40
	Площадь подсечки, м ²	1936,8	2708,5	1600	1295	1936,8	1600
	Объем подсечки, тыс. м ³	19,368	27,085	16	13	19,4	16
максимум	HR	16	17	14	15	13	14
	Ширина подсечки, м	60	66	55	60	50	55
	Длина подсечки, м	68,57	70	57	60	54,17	57
	Площадь подсечки, м ²	4114,2	4620	3135	3600	2708,5	3135
	Объем подсечки, тыс. м ³	41,142	46,2	31,4	36	27,085	31,4

При трещиноватости рудного и породного массива ниже 3 тр/м, величины $HR_{ср}=11$ м будет недостаточно для развития самообрушения, что обуславливает необходимость разработки методов подготовки массива для обеспечения ее трещиноватости более 3 тр/м (рисунок 3, а). При значении предела прочности на сжатие более 50 Мпа, величины $HR_{ср}=11$ м будет недостаточно для эффективного самообрушения, что указывает на необходимость проектирования методов управления трещиноватостью массива, направленных на его разупрочнение для инициации процесса самообрушения. Значение коэффициента напряженного состояния выше 1 также обуславливает сложности с обеспечением процесса самообрушения и необходимость обеспечения его снижения до 1 и ниже (рисунок 3в). Проведенные расчеты для условий трубок Мир и Юбилейная показали аналогичные результаты, что подтверждает сделанные выводы.

Анализ влияния свойств массива на величину HR показал, что наиболее значимыми факторами влияния на HR рудного массива является степень трещиноватости, а для HR породного массива – коэффициент напряженного состояния (рисунок 4), поэтому для эффективного самообрушения массива на контакте руда-порода, даже при существенном их отличии, требуется разработка мероприятий по его предподготовке, направленных на повышение трещиноватости рудного и снижение напряженности породного массивов.

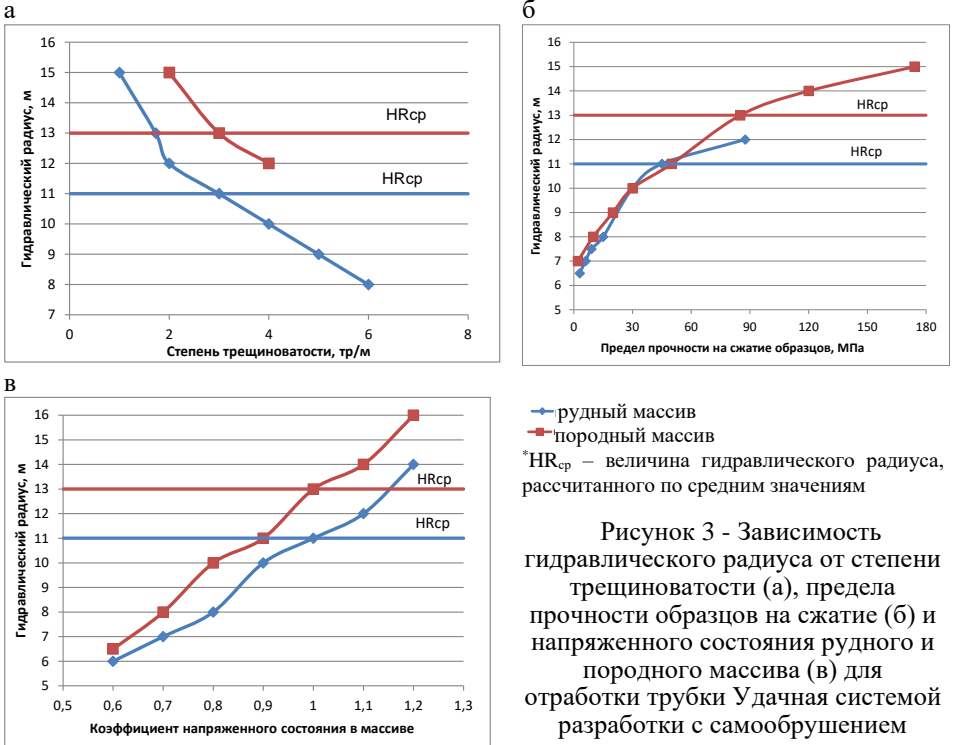


Рисунок 3 - Зависимость гидравлического радиуса от степени трещиноватости (а), предела прочности образцов на сжатие (б) и напряженного состояния рудного и породного массива (в) для отработки трубки Удачная системой разработки с самообрушением

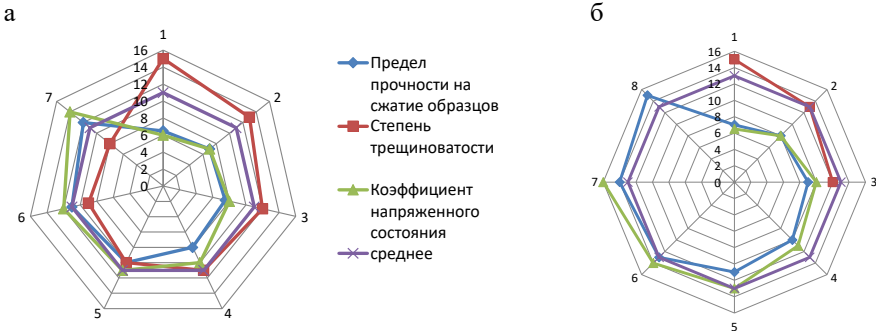


Рисунок 4 – Диаграммы влияния степени трещиноватости, коэффициента напряженного состояния и предела прочности на сжатие на HR для: а – рудного массива; б - породного массива

Аппроксимацией результатов аналитических расчетов для реализации систем разработки с самообрушением при отработке кимберлитовых месторождений Якутии установлены эмпирические зависимости HR от степени трещиноватости (t),

предела прочности на сжатие (f) и коэффициента напряженного состояния (σ) рудного и породного массивов:

$$HR = m_1 \cdot f + m_2 \cdot t + m_3 \cdot \sigma + a \quad (R^2 = 96\%), \quad (3)$$

где a , m_1 , m_2 , m_3 – постоянные, установленные по данным математического моделирования множественной линейной регрессии, которые составляют:

- для рудного массива: $a=1,59$, $m_1=0,085$, $m_2=-1,04$, $m_3=9,33$;

- для породного массива: $a=0,5$, $m_1=0,048$, $m_2=-1,25$, $m_3=12,2$.

Результаты документирования керна (скважины КС-91 и ЭС-98) по геомеханическим параметрам подтвердили выводы о наибольшем влиянии на величину HR степени трещиноватости массива и показали отсутствие четкой связи HR и показателя качества пород RQD.

Анализ диапазона характеристик горного массива – предела прочности на сжатие, степени трещиноватости и коэффициента напряженного состояния показал их широкий разброс при коэффициенте вариации соответственно – 53, 48 и 22 %, что характеризует значительную изменчивость физико-механических свойств и предопределяет необходимость оценки их надежности в зависимости от стадии жизненного цикла реализации технологии с самообрушением при расчете HR.

Учитывая характер влияния характеристик горного массива на его способность к самообрушению, требуемый уровень надежности показателя прочности на сжатие и напряженного состояния массива целесообразно оценивать процентилем – мерой, в которой процентное значение общих значений равен этой мере или меньше ее, а степень трещиноватости – критерием надежности, как меры, в которой процентное значение общих значений равно этой мере или больше

Чем выше процентиль и критерий надежности, тем с большей вероятностью приняты достоверные значения физико-механических свойств при расчете HR. Так, HR с уровнем надежности исходных данных 70%, принятый для стадии проектирования систем разработки с самообрушением при отработке трубки Удачная, составит 9 м, что на 20 и 56 % меньше HR, рассчитанного соответственно по средним и максимальным значениям свойств массива.

Применение любого метода повышения полноты и исследования исходных данных не может обеспечить их достоверность на 100%, поэтому альтернативным варианту увеличения площади подсечки, является подготовка массива с целью обеспечения равномерного характера распространения свойств массива и как следствие планомерного развития фрагментации блока.

С использованием предложенной методики оценки геотехнического риска определено влияние достоверности исходных данных на его уровень при отработке кимберлитовых трубок Удачная, Мир, Юбилейная системами разработки с самообрушением в заданных диапазонах разброса данных степени трещиноватости рудного массива ($\pm 50 \div 75$ % от среднего значения), как наиболее значимого фактора, и уровня надежности исходных данных - от 30 до 85 % (рисунк 5).

При значительной изменчивости данных степени трещиноватости (коэффициент вариации $> 33\%$) и уровне их надежности менее 50%, вероятность геотехнического риска составляет выше 90%. При этом сокращение изменчивости диапазона степени

трещиноватости или повышения надежности исходных данных в 2 раза позволит снизить вероятность геотехнического риска соответственно в 1,7 и 2,25 раз для условий разработки кимберлитовой трубки Удачная. Таким образом, для обеспечения эффективности самообрушения горного массива необходимо либо снижать разброс диапазона исходных данных ($K_{\text{вар}}$), либо повышать их надежность.

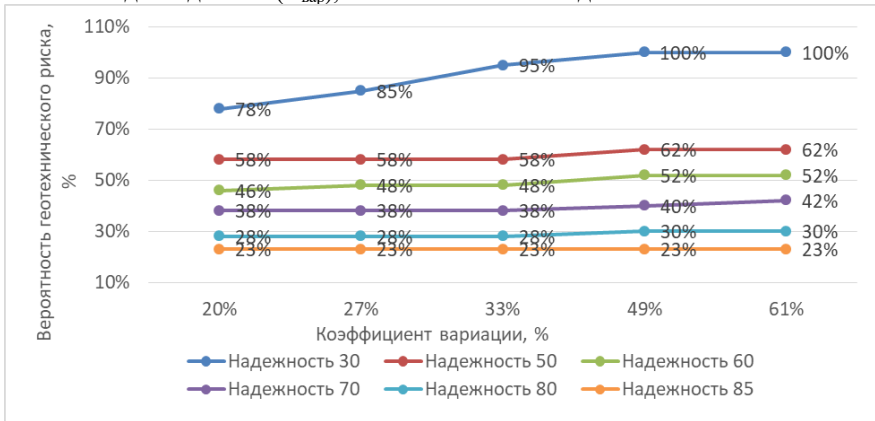


Рисунок 5 – Графики зависимости вероятности геотехнического риска от коэффициента вариации и надежности степени трещиноватости при отработке кимберлитовой трубки Удачная системами разработки с самообрушением

При этом, чем выше надежность исходных данных, тем меньшее влияние на вероятность геотехнического риска оказывает коэффициент вариации диапазона горно-геологической информации. Проведенными исследованиями установлено, что вероятность геотехнического риска не более 60 % обеспечивается надежностью исходных данных более 60% при любой изменчивости свойств массива для условий самообрушения кимберлитовых руд трубок Удачная, Мир и Юбилейная.

Результаты оценки влияния коэффициента вариации и надежности диапазона степени трещиноватости на величину геотехнического риска при различных уровнях последствий для условий подземной разработки трубки Удачная системами разработки с самообрушением представлены в таблице 5.

При низком уровне последствий (таблица 5а), допустимый уровень геотехнического риска для условий реализации систем разработки с самообрушением при отработке трубок Мир, Удачная и Юбилейная обеспечивается надежностью исходных данных не менее 50 % при любой изменчивости диапазона степени трещиноватости массива, что обуславливает расчет площади подсечки с надежностью исходных данных исходя из этапа жизненного цикла реализации технологии.

При среднем уровне последствий (таблица 5б), допустимый геотехнический риск (30%) обеспечивается при надежности исходных данных не менее 60% и изменчивости менее 30%, а при изменчивости степени трещиноватости горного

массива более 50% – при надежности исходных данных не менее 70% для условий трубки Удачная.

а – низкий уровень последствий

Диапазон	20%	27%	32%	49%	62%
Надежность 50	20	20	20	20	20
Надежность 60	10	10	10	20	20
Надежность 70	10	10	10	10	20
Надежность 80	10	10	10	10	10
Надежность 85	10	10	10	10	10

б – средний уровень последствий

Диапазон	20%	27%	32%	49%	62%
Надежность 50	50	50	50	50	50
Надежность 60	30	30	30	50	50
Надежность 70	30	30	30	30	30
Надежность 80	30	30	30	30	30
Надежность 85	30	30	30	30	30

в – высокий уровень последствий

Диапазон	20%	27%	32%	49%	62%
Надежность 50	80	80	80	80	80
Надежность 60	60	60	60	80	80
Надежность 70	60	60	60	60	60
Надежность 80	60	60	60	60	60
Надежность 85	60	60	60	60	60

Таблица 5 – Оценка уровня геотехнического риска при отработке системами разработки с самообрушением кимберлитовой трубки Удачная при различных уровнях последствий

Использование исходных данных с уровнем надежности 50% обуславливает уровень риска – «контролируемый» (50%), что при определении площади подсечки требует применения коэффициента запаса площади подсечки для обеспечения допустимого уровня риска, равного при $K_{\text{вар}}$ до 30% – 1,1, при $K_{\text{вар}}$ более 30% - 1,3.

При высоком уровне последствий (таблица 3в), допустимый геотехнический риск не обеспечивается ни при каком уровне надёжности исходных данных. «Контролируемый» уровень риска достигается при надежности исходных данных не менее 60%, а при высокой изменчивости трещиноватости горного массива ($K_{\text{вар}} > 31\%$) – не менее 70%, что обуславливает необходимость контроля требуемой степени трещиноватости горного массива и реализации мероприятий по его подготовке.

Расчетами установлено, что при изменчивости свойств массива с коэффициентом вариации не более 31%, требуется увеличить его трещиноватость в 1,5 раза, а при $K_{\text{вар}}$ более 62% – до 2 раз и при этом снизить площадь подсечки и соответственно объемы подготовительно нарезных работ (рисунок 6).

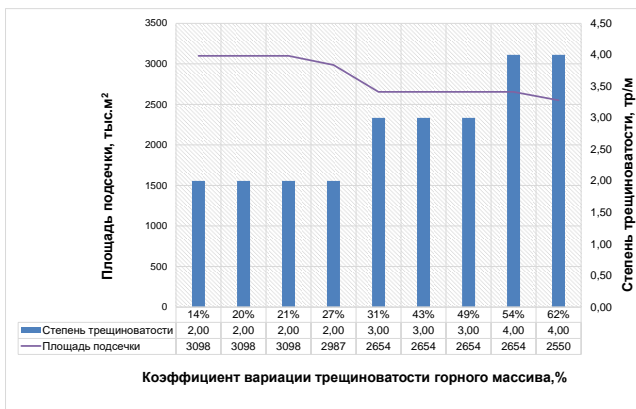


Рисунок 6 – Зависимость требуемой площади подсечки и трещиноватости массива от ее изменчивости для условий кимберлитовой трубки Удачная

Для предподготовки массива в условиях разработки кимберлитовых месторождений Якутии предложено использовать технологию гидроразрыва посредством нагнетания раствора при высоком давлении (до 100 МПа) в скважины, пробуренные вкрест простирания системы трещин с технологического горизонта с целью образования в массиве сети трещин либо по заранее скорректированным плоскостям, либо вдоль естественных трещин. Отсутствие опыта применения гидроразрыва при подземной разработке кимберлитовых трубок требует проведения опытно-промышленных испытаний с целью апробации технологии и уточнения рабочих параметров: расстояние между рядами скважин – 20 метров, между скважинами в ряду – 10 метров, что позволит уточнить степень распространения трещин при гидроразрыве и радиус влияния скважины. Для осуществления гидроразрыва принимается оборудование АКВА-ГРП™ RHP-700, либо аналог.

С целью апробации результатов исследований разработана технология выемки запасов трубки Удачная в отметках гор. -465-680м с использованием варианта системы этажного блокового самообрушения с двойной подсечкой (рисунок 7).

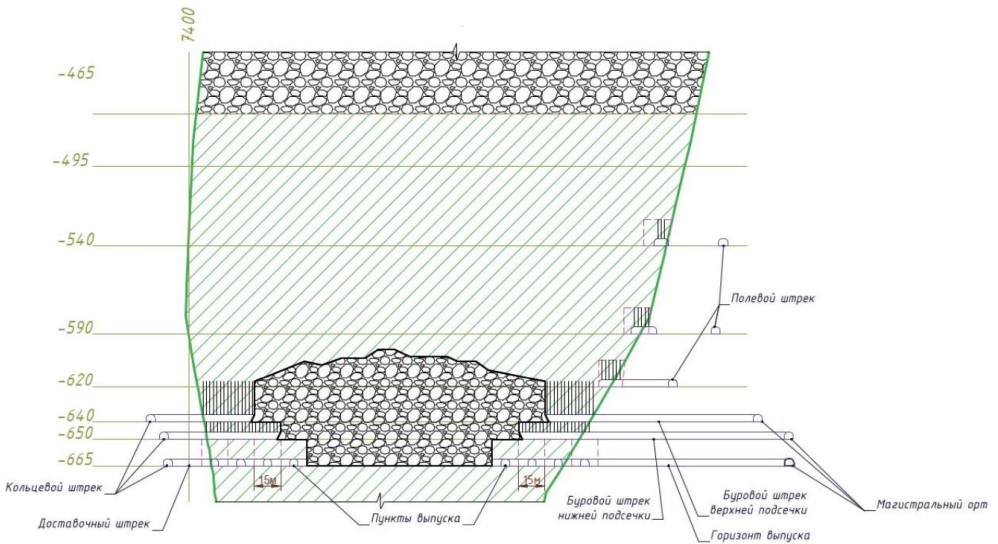


Рисунок 7 – Система разработки этажного блокового самообрушения с двойной подсечкой для условий отработки трубки Удачная

Подготовка запасов блока к самообрушению предусматривает первоначальную дегазацию и дренаж рудного массива, предподготовку массива посредством гидроразрыва, после чего осуществляется взрывание скважин верхней высокой подсечки, пробуренных с горизонта -640 метров. Оформление нижней подсечки и выпускных пунктов в блоке осуществляется после взрывания скважин верхней подсечки (горизонт -640 метров).

Для наблюдения за процессами самообрушения и развитием зон обрушения в пространстве и времени рекомендуется внедрить на руднике комплексную систему мониторинга, которая позволяет отслеживать процесс самообрушения руды, определять масштабы самообрушения и контролировать потоки выпуска руды.

Для практического применения результатов исследований разработаны методика и алгоритм определения параметров технологии с учетом геотехнического риска на этапе проектирования при системах разработки с самообрушением (рисунок 8).

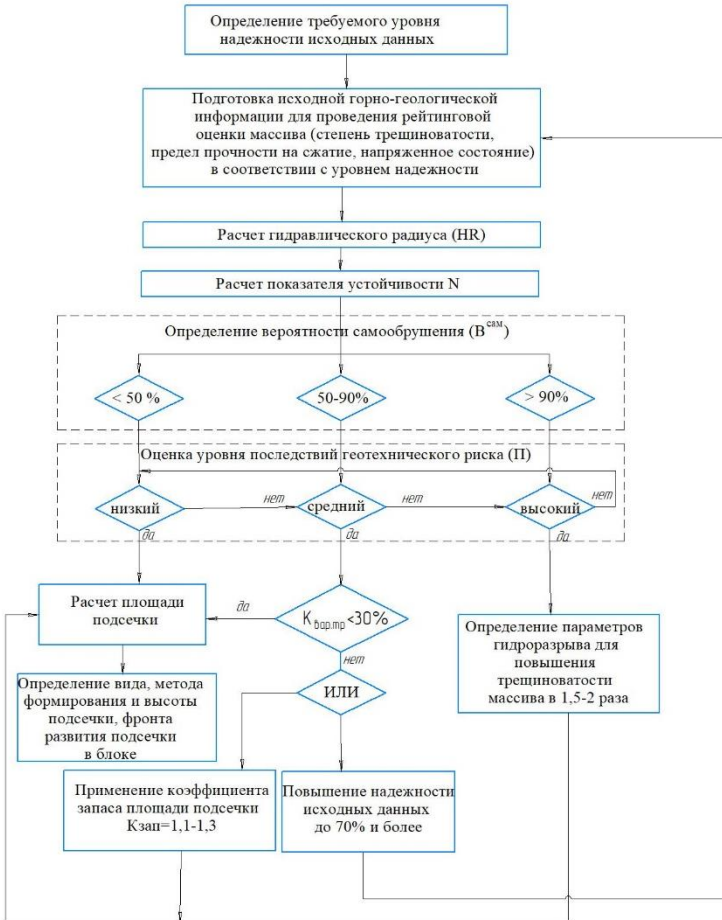


Рисунок 8 – Алгоритм определения параметров технологии освоения кимберлитовых месторождений Якутии с учетом геотехнического риска на этапе проектирования при системах разработки с самообрушением

Экономические расчеты, для условий применения системы разработки с самообрушением руд и вмещающих пород для условий трубки Удачная, показали, что учет геотехнического риска позволяет не только повысить эффективность реализации технологии, снизить риски аварийных ситуаций, обусловленных отсутствием фрагментации, но и уменьшить экономические затраты до 3128, 4 млн руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной научной задачи, заключающейся в обосновании параметров систем разработки с самообрушением с учетом геотехнического риска для сложных горно-геологических условий подземной разработки кимберлитовых месторождений Якутии, имеющей важное значение для развития горнорудной промышленности страны.

Основные научные результаты, практические выводы и рекомендации:

1. Сконструирована технологическая схема освоения кимберлитовых месторождений Якутии с применением систем разработки с самообрушением с учетом негативного влияния гидрогеологических, геомеханических и газодинамических условий отработки при снижении качества полезного ископаемого с глубиной залегания рудных тел, учитывающая предварительную дегазацию, дренаж и подготовку массива с целью компенсации негативного влияния осложняющих факторов и активации процессов фрагментации и самообрушения.

2. Предложены систематизации геотехнического риска и методов его управления при системах разработки с самообрушением руд и вмещающих пород, позволяющие определить основные опасности и условия их формирования в зависимости от стадии жизненного цикла проекта, факторов и источников риска.

2. Разработан динамический критерий оценки геотехнического риска, учитывающий основные факторы, оказывающие влияние на уровень геотехнического риска при применении систем разработки с самообрушением и позволяющий своевременно реагировать на изменение свойств горного массива на всех стадиях реализации технологии.

3. Установлено, что основными факторами геотехнического риска при системах разработки с самообрушением являются недостоверность, а в некоторых случаях недостаточность исходной горно-геологической информации, различие характеристик рудного и породного массива и разброс диапазона данных массива.

4. Доказано, что на величину гидравлического радиуса оказывает совокупное влияние степени трещиноватости, прочности руд и пород на сжатие и напряженное состояние массива. Получены эмпирические зависимости в виде уравнений множественной регрессии, позволяющие осуществить расчет гидравлического радиуса в зависимости от вышеперечисленных факторов для условий реализации систем разработки с самообрушением при отработке кимберлитовых месторождений Якутии.

5. По результатам документирования керна подтверждено, что наибольшее влияние на гидравлический радиус, и соответственно на параметры подсечки, оказывает

трещиноватость массива, что обуславливает необходимость разработки мероприятий, направленных на ее управление.

6. Установлено, что при низком уровне последствий для обеспечения допустимого уровня риска при применении систем разработки с самообрушением в условиях кимберлитовых месторождений Якутии, необходимо обеспечить надежность исходных данных не менее 50 % вне зависимости от изменчивости трещиноватости массива. При среднем уровне последствий наиболее эффективными методами обеспечения самообрушения руды являются обеспечение надежности исходных данных не менее 70%, либо использование коэффициента запаса площади подсечки – 1,1-1,3. При высоком уровне последствий для обеспечения допустимого уровня риска при применении систем разработки с самообрушением, в условиях кимберлитовых месторождений Якутии необходимо осуществлять оперативное управление трещиноватостью массива реализацией методов его заблаговременной подготовки посредством гидроразрыва.

7. Разработан алгоритм определения параметров технологии подземной разработки кимберлитовых месторождений Якутии с учетом уровня геотехнического риска на этапе проектирования систем разработки с самообрушением, который учитывает надежность и изменчивость исходных данных.

8. Разработаны методические рекомендации по обоснованию параметров системы разработки с самообрушением с учетом геотехнического риска для условий кимберлитовой трубки Удачная, реализация которых позволила установить, что для эффективного применения системы на данном месторождении необходимо рассчитывать параметры с надежностью исходных данных не менее 70 % и повысить трещиноватость массива в 1,5-2 раза путем проведения гидроразрыва. Реализация данной системы разработки с учетом рекомендаций позволит получить экономический эффект до 3128, 4 млн руб./год.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:
в изданиях, рекомендованные ВАК Минобрнауки РФ**

1. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки "Интернациональная" / **А. А. Коваленко**, Н. Е. Захаров, Э. К. Пуль, В. Г. Золотин // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 27-31. – DOI 10.17580/gzh.2019.02.05.

2. **Коваленко, А. А.** Оценка подземного способа отработки месторождения трубки "Удачная" с применением системы с самообрушением / **А. А. Коваленко**, М. В. Тишков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 12. – С. 134-145.

3. Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования /В. Н. Лушников, М. П. Сэнди, В. А. Еременко, **А. А. Коваленко**, И. А. Иванов // Горный журнал. – 2013. - № 12. – С. 11-16.

патенты

1. Патент № 2607829 Российская Федерация, МПК F42D 1/08, F42D 3/04, E21C 37/06. Способ разрушения горных пород и руд гидровзрывом : № 2015113653 : заявл.

13.04.2015 : опублик. 20.01.2017 / Ю. А. Дик, А. В. Котенков, **А. А. Коваленко** [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых "Уралмеханобр" (ОАО "Уралмеханобр").

в прочих научных изданиях

1. **Kovalenko, A. A.** Substantiation of Geotechnical Risk Assessment Criterion for Mining Systems with Uncontrolled Caving of Ore and Surrounding Formations / A. A. Kovalenko, O. V. Petrova, Y. D. Mambetova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, 10–12 января 2022 года. – Virtual, Online, 2022. – P. 032046. – DOI 10.1088/1755-1315/988/3/032046.

2. Коваленко, А. А. Оценка технологического риска при комбинированной разработке с самообрушением кимберлитовых трубок Якутии / **А. А. Коваленко**, О. В. Петрова, Ю. Д. Мамбетова // Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр, Магнитогорск, 24–28 мая 2021 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. – С. 150-152.

3. Оценка факторов геотехнического риска при отработке кимберлитовых трубок Якутии системами разработки блокового самообрушения / **А. А. Коваленко**, О. В. Петрова, В. Н. Калмыков, Ю. Д. Мамбетова // Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность: Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию института "Якутнипроалмаз" АК "АЛРОСА", Мирный, 15–16 сентября 2021 года. – Мирный: Акционерная компания "АЛРОСА" (публичное акционерное общество), 2021. – С. 79-80.

4. **Kovalenko, A. A.** Assessment of the Influence of Technological Risk Factors on the Undercut Parameters When Mining Kimberlite Using Block Caving / A. A. Kovalenko, O. V. Petrova, Y. D. Mambetova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2021. – P. 022049. – DOI 10.1088/1755-1315/666/2/022049.

5. Оценка рисков при отработке кимберлитовых месторождений Якутии системами разработки с самообрушением / **А. А. Коваленко**, О. В. Петрова, В. Н. Калмыков, Ю. Д. Мамбетова // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр", Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ОАО "Уралмеханобр", 2019. – С. 107-113.

6. **Коваленко, А. А.** О совершенствовании нормативной базы оценки рисков при разработке рудных месторождений / А. А. Коваленко, В. Н. Калмыков, О. В. Петрова // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Материалы докладов Международной конференции: сборник тезисов, Магнитогорск, 27–31 мая 2019 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 85-86.