На правах рукописи

Лизункин Михаил Владимирович

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Специальность

25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Чита - 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Забайкальский государственный университет»

Научный консультант	**Галченко Юрий Павлович,** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Савич Игорь Николаевич,** доктор технических наук, профессор, Горный институт НИТУ «МИСиС», профессор кафедры геотехнологии освоения недр **Макишин Валерий Николаевич,** доктор технических наук, доцент, Политехнический институт (Школа) ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», профессор отделения горного и нефтегазового дела **Павлов Александр Митрофанович**, доктор технических наук, Институт недропользования ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится **«** 30 **»** апреля 2021 года в 15^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.299.08 при ФГБОУ ВО «ЗабГУ» по адресу: 672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по адресу: 672007, г. Чита, ул. Бабушкина, 129 и на сайте ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» по электронному адресу: http://zabgu.ru/files/html_document/pdf_files/fixed/Lizunkin/Dissertatsia_Lizunkin_M_V.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
докт. техн. наук, доцент Г.П. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Освоение минерально-сырьевых ресурсов недр – материальная и энергетическая основа существования технократической цивилизации в настоящее время и будущем. При этом темпы увеличения объемов добычи полезных ископаемых почти на порядок опережают темпы прироста населения земного шара.

В настоящее время наиболее простые по геологическому строению, доступные по географическому положению и богатые по качеству рудного сырья месторождения в значительной степени уже отработаны.

Определяющее место в перспективе развития сырьевой базы практически всех видов минерального сырья занимают сложноструктурные рудные месторождения цветных, редких, благородных металлов и урана, имеющие крайне сложные горно-геологические и горнотехнические условия.

Для месторождений этого типа как в целом, так и по отдельным рудным телам и выемочным блокам характерны:

- изменчивость мощности рудных тел в широком диапазоне от нескольких сантиметров до десятков метров и угла падения от 0 до 90^0;
- сложная морфология залежей по падению и простиранию;
- прерывистость оруденения и крайне неравномерное распределение полезного компонента в объеме рудных тел;
- изменчивость устойчивости и физико-механических свойств руды и вмещающих пород;
- неравномерность и характер проявления горного давления;
- наличие разномасштабных тектонических нарушений;
- техногенные изменения в горном массиве (перераспределение поля напряжений, запасов полезного ископаемого и др.), вызванные первичной отработкой рудных залежей открытым либо подземным способом.

Горно-геологические и горнотехнические факторы, формирующие сложность структуры месторождений, весьма разные. Однако технологические решения и применяемое оборудование практически либо однотипны и оптимальны для определенных условий, либо имеет место их многообразие в схемах подготовки, нарезки и очистной выемки. Последнее усложняет и удорожает ведение горных работ и требует высокой квалификации рабочих и инженерно-технических работников. Кроме того, одни технологии высокопроизводительны и низкозатратны, но имеют существенные потери и разубоживание (например, системы разработки с открытым выработанным пространством и скважинной отбойкой), а другие - наоборот (системы разработки с шпуровой отбойкой, закладкой выработанного пространства и др.). Общим существенным недостатком для этих технологий является высокая степень деконцентрации горных работ.

В связи с этим, освоение таких месторождений требует поиска и создания более эффективных геотехнологий (физико-технических, физико-химических или комбинированных) на основе совершенствования способов подготовки, отбойки и доставки руды, управления горным давлением и качеством полезного ископаемого.

Поэтому обоснование эффективной геотехнологии подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит увеличить

производительность труда, улучшить качественные и количественные показатели извлечения, снизить себестоимость добычи, повысить безопасность ведения горных работ и расширить минерально-сырьевую базу как на эксплуатируемых, так и разведанных месторождениях.

Диссертация выполнена в ходе реализации комплексного проекта по созданию на подземных рудниках ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО») высокотехнологичного производства «Создание комплексной технологии отработки беднобалансового уранового сырья геотехнологическими методами» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0013) и хозяйственного договора с Бом-Горхонским рудником ООО «Старательская артель «Кварц» (договор №809).

Степень научной разработанности

Значительный вклад в развитие и совершенствование подземной геотехнологии разработки сложноструктурных рудных месторождений внесли известные советские и российские ученые М.И. Агошков, В.Ф. Абрамов, В.Е. Аврамов, С.Д. Викторов, Н.З. Галаев, Ю.П. Галченко, А.А. Еременко, В.А. Еременко, В.М. Закалинский, В.Р. Именитов, Р.П. Каплунов, Д.Р. Каплунов, А.А. Козырев, Е.В. Кузьмин, В.И. Култышев, М.В. Курленя, Г.А. Курсакин, Н.Х. Загиров, О.В. Зотеев, В.М. Лизункин, В.Г. Литвиненко, А.И. Ляхов, В.Н. Макишин, Л.А. Мамсуров, А.Ф. Назарчик, Б.Н. Нифонтов, В.А. Овсейчук, А.М. Павлов, Е.И. Панфилов, Г.Г. Пирогов, И.Ю. Рассказов, Д.И. Рафиенко, М.В. Рыльникова, И.Н. Савич, И.В. Соколов, Л.И. Сосновский, В.Н. Тюпин, А.М. Фрейдин, В.Н. Фрянов и многие другие.

Ведущими институтами в области создания технологий разработки таких месторождений являются ИПКОН РАН, ГИПРОцветмет, ВНИПИпромтехнологии, Горный институт НИТУ «МИСиС» (г.Москва); Горный институт КФ РАН (г.Апатиты); ИГД СО РАН (г.Новосибирск); ИГД УрО РАН, Уральский государственный горный университет (г.Екатеринбург); ИГД ДВО РАН (г.Хабаровск); ИГДС СО РАН (г.Якутск); Читинский филиал ГИПРОцветмет; Санкт-Петербургский горный университет; Сибирский (г.Красноярск), Дальневосточный (г.Владивосток) федеральные университеты; ИрНИТУ, Иргиредмет (г.Иркутск); Забайкальский государственный университет (г.Чита); Южно-Российский государственный политехнический университет (г. Новочеркасск) и другие предприятия и организации.

Несмотря на большие объемы исследований в этой области, существующие геотехнологии добычи руды из сложноструктурных месторождений характеризуются большой трудоёмкостью, невысокими технико-экономическими показателями, значительными потерями и разубоживанием руды.

Автором проведены исследования по обоснованию эффективной геотехнологии подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений, результаты которых отражены в научных положениях диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – обоснование геотехнологии подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений, обеспечивающей эффективность и безопасность добычи руды из недр.

Идея работы заключается в том, что при разработке сложноструктурных рудных месторождений диапазон возможностей геотехнологии определяется характером и уровнем вариабельности горно-геологических факторов.

Задачи исследований:

1. Разработать методологию идентификации сложноструктурных месторождений как объекта разработки.

2. Установить особенности проявления горного давления при разработке сложноструктурных рудных месторождений.

3. Выявить характер изменения напряженно-деформированного состояния массива в технологиях с заполнением выработанного пространства рудной массой и особенности её движения при выпуске из узкого очистного пространства.

4. Обосновать методологию выбора и применения универсальной технологии взрывной отбойки.

5. Сформулировать принципы построения новой геотехнологии и разработать высокоэффективные геотехнологические схемы отработки сложноструктурных залежей, адаптируемые к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям.

6. Провести опытно-промышленные испытания, внедрение и определить технико-экономическую эффективность разработанных геотехнологий.

Научная новизна работы:

- определена и исследована совокупность геологических и горнотехнических факторов, определяющих сложность структуры месторождения, как объекта разработки, и предложен новый методологический подход к оценке локальных и интегральных показателей на основе сопоставления диапазона и шага изменчивости каждого фактора;

- разработан комплекс новых формализованных индикаторов измерения сложности структуры рудных месторождений, как горнотехнических объектов, позволяющий дать их интегральную и дифференцированную оценку в процессе выбора геотехнологических решений;

- установлены зависимости изменения первоначальных природных напряжений горного массива от глубины разработки и характер распределения напряжений в междуэтажных и междукамерных целиках, кровле очистных камер при разработке сложноструктурных месторождений и на их основе усовершенствована методика расчета устойчивых размеров целиков и обнажений кровли камер;

- определены показатели деформационных и прочностных свойств массива раздробленных пород в зависимости от средневзвешенного размера куска и величины нагрузки и установлено их влияние на напряженно-деформированное состояние бортов карьера и подземной камеры в зависимости от степени заполнения геоматериалом;

- установлены характер движения рудной массы в узком очистном пространстве, особенности её деформирования и определены зависимости площади зависаний и эллипсоидов выпуска и относительной продольной деформации раздробленной руды от её плотности (коэффициента разрыхления), влажности, угла падения, мощности залежи и ширины рудного столба;

- выявлен характер распределения полезного компонента по классам крупности при увеличении масштаба отбойки в условиях ограниченной выемочной мощности и установлено, что эффект обогащения рудной мелочи в процессе отбойки определяется не только размером зоны бризантного действия зарядов, но и формой нахождения полезного компонента в руде;

- на основании ранее проведенных и собственных исследований выдвинута и разработана гипотеза механизма взрыва параллельно сближенными зарядами, в которой разрушение массива происходит от волн деформаций при взрыве ВВ и упругой реакции массива при взаимодействии их по линии зарядов, и установлено, что характер распределения общей энергии взрыва в отбиваемом массиве соответствует требованиям технологически обусловленной асимметрии этого распределения;

- обоснованы принципы построения новой геотехнологии и разработаны унифицированные и адаптируемые к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям технологические схемы подготовки и отработки рудных тел, установлены зависимости изменения основных технико-экономических показателей и определена область рентабельного применения технологических схем разработки маломощных пологих и наклонных сложноструктурных месторождений.

Практическое значение работы заключается в обосновании принципов создания горнотехнических решений и их адаптации к особенностям строения сложноструктурных рудных месторождений и разработке типовых геотехнологий, в которых унифицированные технологические схемы подготовки использованы в сочетании с физико-химическими и физико-техническими технологиями очистной выемки с валовым или селективным извлечением руды, а соотношение применяемых технологий в каждом конкретном случае зависит от иерархии факторов, определяющих сложность структуры разрабатываемого месторождения.

Разработанные и патентно защищенные технологические схемы подготовки и отработки рудных тел, а также методики, созданные на основе установленных зависимостей, могут применяться в различных горно-геологических и горнотехнических условиях сложноструктурных месторождений при проектировании, научных исследованиях, внедрении, а также создании новых физико-технических, физико-химических и комбинированных геотехнологий.

Методы исследований. При выполнении работы использован комплекс методов исследований, включающий обобщение и анализ теории и практики разработки сложноструктурных месторождений при создании геотехнологических схем; теоретические, экспериментальные исследования в натурных условиях и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород и конструктивных элементов систем разработки; исследования на большеразмерном стенде деформационных и прочностных свойств раздробленной скальной руды; инструментальные (метод полигонометрических ходов) и геофизические (метод электротомографии) для оценки устойчивости бортов карьера и подземных выработок; лабораторные исследования на физической модели процессов выпуска и деформирования руды в «узком» магазине; обработка результатов экспериментов методами математической статистики; анали-

тические исследования при установлении влияния морфологии жил на технологические параметры; опытно-промышленные испытания и внедрение способов отбойки руды, систем разработки, технологий зачистки обогащенной рудной мелочи и отработки междукамерных целиков; технико-экономические расчеты и анализ при определении области применения разработанных технологий.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Количественная оценка сложности структуры месторождения осуществляется по интегральному показателю, равному сумме частных, характеризующих условия разработки, параметры залегания и внутреннее строение рудных тел, степень техногенной измененности недр, а принадлежность к определенному классу месторождения как объекта разработки определяется по классификации сложноструктурных рудных месторождений.

2. Безопасная и эффективная отработка сложноструктурных рудных месторождений достигается применением систем разработки с устойчивыми конструктивными элементами, параметры которых определяются с учетом выявленных закономерностей изменения первоначального природного поля напряжений горного массива и влияния гипсометрии выработанного пространства.

3. Эффективное применение в геотехнологиях раздробленной горной массы обеспечивается использованием в геомеханических расчетах установленных прочностных и деформационных свойств в зависимости от гранулометрического состава и прилагаемой нагрузки и учета её влияния на напряженно-деформированное состояние природных и техногенно измененных массивов горных пород и устойчивость технологических обнажений.

4. Эффективное применение системы с магазинированием при отработке маломощных крутопадающих жил в условиях значительного горного давления и недостаточно устойчивых вмещающих породах достигается временным оставлением в выработанном пространстве вертикального столба из отбитой руды, образованного поверхностями эллипсоидов выпуска, соответственно деформация и устойчивые размеры которых определяются в зависимости от коэффициента разрыхления и влажности руды, угла падения и мощности залежи, ширины рудного столба.

5. Совершенствование технологии отбойки руды при разработке сложноструктурных месторождений осуществляется применением шпуровых или скважинных параллельно сближенных зарядов, щелевой либо валовой выемки руды с перераспределением энергии ВВ в разрушаемом массиве в зависимости от горно-геологических, горнотехнических и технологических факторов.

6. Повышение производительности труда, полноты и качества выемки полезного ископаемого, безопасности труда и рентабельной разработки сложноструктурных месторождений достигается применением разработанных унифицированных технологических схем подготовки и отработки рудных тел физико-технической, физико-химической и комбинированной геотехнологиями, базирующимися на установленных закономерностях развития физических процессов отбойки, доставки, управления горным давлением и рудосортировки.

Достоверность научных выводов, положений и результатов обеспечены удовлетворительной сходимостью лабораторных, аналитических и натурных исследований, положительными результатами опытно-промышленных испытаний и внедрения разработанных технологий, соответствием физических и математических моделей реальному состоянию массива горных пород и происходящих в нем процессов, достаточным и представительным объемом экспериментальных исследований основных процессов добычи руды.

Реализация результатов работы. Основные рекомендации исследований приняты на рудниках ПАО «ППГХО» и Бом-Горхонском руднике для внедрения и внедрены в производство при разработке сложноструктурных месторождений физико-техническими и физико-химическими геотехнологиями с экономическим эффектом 328,1 млн. руб.

Результаты диссертационной работы используются также в учебном процессе ФГБОУ ВО ЗабГУ при подготовке горных инженеров по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Подземная разработка рудных месторождений».

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях «Кулагинские чтения» (г.Чита, ЗабГУ, 2007-2010, 2014, 2015, 2017 гг.); научно-технических конференциях Горного института ЧитГУ (2008-2010 гг.); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г.Москва, МГГУ 2008, 2009 гг., МИСиС 2014-2017 гг.); V Международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение и сохранение недр Земли» (г.Екатеринбург, 2009 г.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геомеханика в горном деле» (г.Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2014 г.); VI научно-практической конференции «Игошинские чтения» (г.Иркутск, ИРНИТУ, 2016 г.); VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (г.Санкт-Петербург, СПГУ, 2017 г.); на расширенных семинарах горного факультета ЗабГУ, на технических совещаниях ПАО «ППГХО» (г.Краснокаменск, 2013-2019 гг.), Бом-Горхонского рудника (г.Чита, п.Новопавловка, 2007-2009 гг.).

Личный вклад автора состоит в выявлении проблемы и обосновании перспективных направлений её решения; руководстве и непосредственном участии в исследованиях; постановке и проведении аналитических исследований, натурных, лабораторных, опытно-промышленных испытаний и внедрении разработанных технологий; обработке и анализе полученных результатов; установлении закономерностей и зависимостей изучаемых процессов; формулировании рабочих гипотез, разработке и усовершенствовании методик; обосновании принципов построения и создании новых технологических схем подготовки и отработки рудных тел сложноструктурных месторождений; проведении технико-экономических расчетов и оценке разработанных технологий.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 48 печатных работ, в том числе 23 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

России, из них 5 – в базах цитирования Scopus,GeoRef, Chemical Abstracts, получено 7 патентов РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 240 наименований и 15 приложений. Работа представлена на 439 страницах машинописного текста, содержит 125 рисунков, 51 таблицу и приложения на 127 страницах.

Во **введении** изложены актуальность, степень разработанности, цель, идея и задачи исследований. Представлена новизна работы и научные положения, практическая значимость, методология и методы исследований, степень достоверности, реализация и апробация результатов. **В первой главе** приведены понятие «сложноструктурные месторождения» и их классификация, методика количественной оценки сложности структуры месторождения, анализ опыта их эксплуатации и обоснование перспективных направлений совершенствования подземной геотехнологии. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований. **Вторая глава** посвящена исследованиям особенностей проявления горного давления: определение первоначального природного поля напряжений, влияние гипсометрии выработанного пространства на напряженное состояние целиков и кровли камер. **В третьей главе** приведены результаты исследований деформационных и прочностных свойств раздробленных скальных пород, особенностей изменения напряженно-деформированного состояния массива в технологиях с заполнением выработанного пространства раздробленной рудой и её выпуска из узкого очистного пространства («узких» магазинов»). **Четвертая глава** посвящена обоснованию эффективной технологии отбойки руды. Разработаны методики определения области применения шпуровой и скважинной отбойки и классификация рудных жил в зависимости от их морфологии. Выполнены экспериментальные исследования щелевой и валовой выемки в шахтных условиях, разработана методика расчета параметров буровзрывных работ при отбойке руды параллельно сближенными зарядами. **В пятой главе** приведены основные принципы построения новой геотехнологии, унифицированные технологические схемы подготовки и отработки рудных тел сложноструктурных месторождений. **В шестой главе** представлены результаты опытно-промышленных испытаний, внедрения и технико-экономической оценки эффективности вариантов геотехнологии для отработки маломощных пологих и наклонных жил сложноструктурных месторождений. **В заключении** диссертации обобщены результаты исследований в соответствии с поставленными задачами. Представлен **список литературы**, используемой автором при выполнении работы. В **приложении** приведены материалы, подтверждающие достоверность полученных новых знаний и реализацию разработанных рекомендаций в производство.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту доктору технических наук Ю.П. Галченко, докторам технических наук В.А. Бабелло за консультации, советы и помощь при проведении исследований, П.Б. Авдееву за постоянное внимание к работе, кандидату технических наук А.В. Бейдину за помощь при проведении натурных экспериментов, сотрудникам кафедры ПРМПИ ЗабГУ, а также руководителям и ведущим специалистам ПАО «ППГХО» и Бом-Горхонского рудника за поддержку работы и высказанные ценные замечания и предложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых научных положениях.

1. Количественная оценка сложности структуры месторождения осуществляется по интегральному показателю, равному сумме частных, характеризующих условия разработки, параметры залегания и внутреннее строение рудных тел, степень техногенной измененности недр, а принадлежность к определенному классу месторождения как объекта разработки определяется по классификации сложноструктурных рудных месторождений.

*Сложноструктурны*е в геологическом отношении *рудные месторождения* – это месторождения, характеризующееся различным генезисом геологических образований, сложностью петрографического состава, влиянием дизъюнктивных и пликативных нарушений залегания горных пород, различием структурных неоднородностей (от нулевого до четвертого порядка), многообразием химического и минерального состава и др.

Несколько другое объяснение термина *«сложноструктурные рудные месторождения»* придается при его рассмотрении с горно-технологической точки зрения как объекта разработки. В этом случае под структурой месторождения понимается пространственное расположение рудных тел и вмещающих пород, морфология рудных тел, их внутреннее строение и взаимоотношение с вмещающими породами, являющееся результатом сложных взаимодействий процессов образования пород и руд, а также проявления тектонических движений.

Рудные месторождения, имеющие сложное геолого-морфологическое строение, характеризуются следующими основными признаками: формой и размерами рудных тел; характером оруденения; условиями залегания; физико-механическими свойствами горных пород.

По этим признакам сложноструктурные месторождения разделяются на *природные и техногенные,* классификация которых представлена в таблице 1.

Естественная (для природных) и искусственная (для техногенно измененных) изменчивость элементов геологического строения месторождения осложняет его разработку. Поэтому она может быть показателем, определяющим сложность структуры этого месторождения как геотехнологического объекта. Способ разработки месторождения и технология добычных работ определяются в каждом случае величиной геофакторов, отражающих геологическое строение месторождения, возможностями горного оборудования и применяемых технических решений. Вероятно, что чем стабильнее горно-геологические условия разработки, тем проще, надежнее и экономически эффективнее будет выбранная геотехнология. С повышением степени изменчивости значений геологических факторов осложняется выбор технологий разработки (необходимость применения различных технологических схем, способов и параметров основных процессов очистной выемки, деконцентрации горных работ и т.д.) и снижается эффективность их применения.

Таблица 1 – Классификация сложноструктурных рудных месторождений

Класс месторождения	Тип месторождения
Природные	1. Месторождения с гнездовым характером оруденения. 2. Месторождения, представленные одиночными или сближенными жилами и линзами неправильной формы, для которых характерно самое разнообразное пространственное положение жил и линз переменной мощности, изменчивый характер оруденения и наличие безрудных прослойков. 3. Месторождения, представленные штокверками – рудными телами неправильной формы с прожилково-вкрапленным, весьма неравномерным характером оруденения. 4. Месторождения, представленные одиночными или сближенными пластообразными рудными телами переменной мощности с разными углами падения. 5. Комбинированные - сочетание двух и более предыдущих типов месторождений.
Техногенные (структурно измененные или вновь образованные в результате применения различных технологий добычи и переработки минерального сырья из природных месторождений)	1. Все типы природных месторождений, оставшиеся в: -прибортовых и подкарьерных запасах при открытой добыче; -подземных запасах в результате опережающей отработки богатых руд; -подземных запасах в результате отработки балансовых руд в простых (благоприятных) горно-геологических и горнотехнических условиях. 2. Забалансовые запасы руд от подземной и открытой добычи: - складированные в отвалах на поверхности; - складированные в выработанном пространстве шахты.

В этой связи интервал изменения количественных характеристик каждого из геофакторов, составляющих структуру месторождения, можно принять в качестве критерия сравнительной оценки влияния этого фактора на условия применения геотехнологий, а их сумма позволит количественно оценить сложность структуры месторождения в целом как объекта разработки (рисунок 1).

В целом для месторождения по [Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Сабянин Г.В.] с учетом влияния техногенности, предложенной автором, **коэффициент сложности структуры месторождения $K_{см}$** составит:

$$K_{см} = K_{у} + K_{п} + K_{вн} + K_{т} \quad (1)$$

Каждый коэффициент сложности в выражении (1) определяется как сумма коэффициентов осцилляции факторов, на него влияющих, а коэффициент осцилляции рассчитывается как сумма частных показателей, отражающих степень влияния фактора и диапазона его изменения.

Например, величина коэффициента сложности техногенно измененных недр $K_{т}$ равна сумме частных показателей, отражающих степень влияния величины остаточных запасов $\rho^{/}_{v}$ и диапазона его изменения $\rho^{//}_{v}$ ($K_{т}= \rho^{/}_{v} + \rho^{//}_{v}$.).

Частный показатель, отражающий степень влияния величины остаточных запасов $\rho^{/}_{v}$, определяется по выражению:

$$\rho^{/}_{v} = \frac{V_{общ.з.} - V_{доб.з.}}{V_{общ.з.}} = \frac{V_{техн.изм.з.}}{V_{общ.з.}}, \quad (2)$$

где Vобщ. з. – общие запасы месторождения, т; Vдоб. з. – добытые запасы месторождения, т; V техн. изм. з. – техногенно измененные (остаточные) запасы, т.

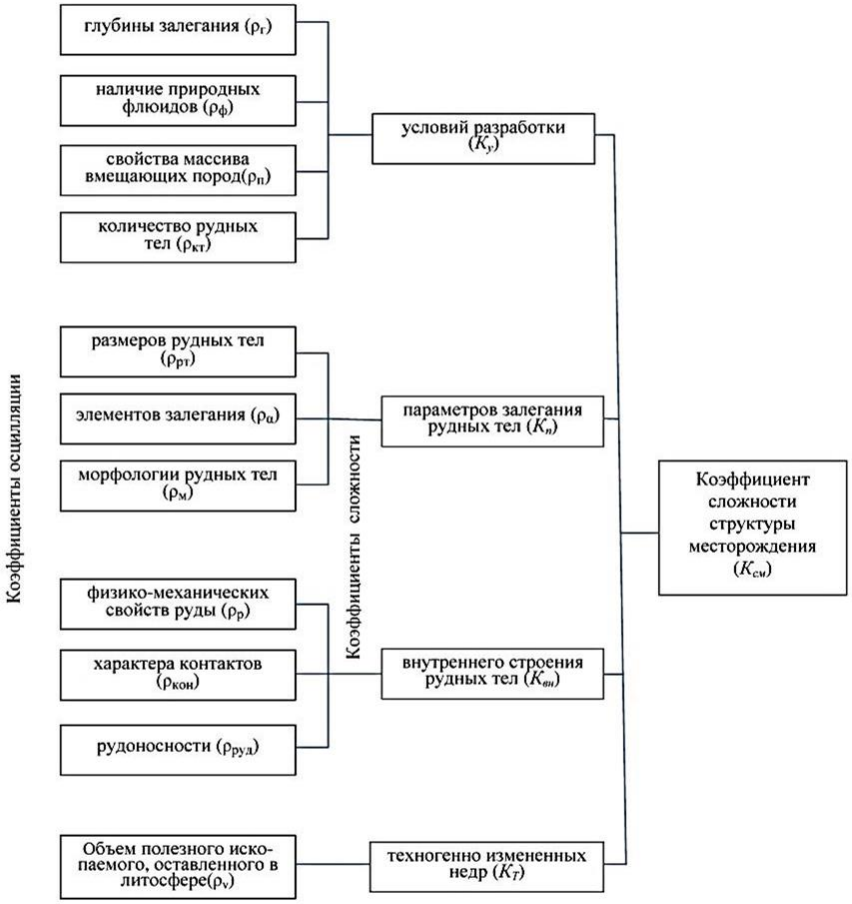


Рисунок 1 - Схема последовательности оценки сложности структуры природных и техногенно измененных месторождений

Влияние диапазона изменчивости рассматриваемого геофактора учитывает частный показатель $\rho^{//}_{v}$:

$$\rho^{//}_{v} = \frac{2(Vmax\ \text{п.и.} - Vmin\ \text{п.и.})}{Vmax\ \text{п.и.} + Vmin\ \text{п.и.}}, \quad (3)$$

где $Vmax$ п. и. – максимальный объем извлекаемого полезного ископаемого в блоке, панели, залежи, месторождении, равный остаточным запасам, т; $Vmin$ п. и. - минимальный объем извлекаемого полезного ископаемого в блоке, панели, залежи, месторождении, который определяется в зависимости от применяемой системы разработки и нормированных потерь для неё, т.

Остальные формулы расчетов коэффициентов приведены в диссертации.

Применение предлагаемой методики определения сложности структуры природных и техногенно измененных месторождений позволит:

а) комплексно оценить сложность структуры месторождения по сумме геологических характеристик, интегрированных в общий показатель; б) дать количественную характеристику степени влияния геологических параметров месторождения на сложность геотехнологических задач при его разработке; в) повысить достоверность предпроектных оценок эффективности геотехнологии; г) обосновать на основе геологических характери-

стик месторождения возможные варианты его разработки и необходимые размеры инвестиций.

2. Безопасная и эффективная отработка сложноструктурных рудных месторождений достигается применением систем разработки с устойчивыми конструктивными элементами, параметры которых определяются с учетом выявленных закономерностей изменения первоначального природного поля напряжений горного массива и влияния гипсометрии выработанного пространства.

Измерения напряжений горных пород в натурных условиях производили методом щелевой разгрузки по методике Института горного дела УрО РАН (Влох Н.П., Зубков А.В.).

На *Бом-Горхонском месторождении* напряжения определяли в породах и руде жил № 1 и 1/16 (в штреках и квершлагах на гор. 1080 м и 1110 м). Всего проведено 44 измерения в 44 разгрузочных щелях. Средние значения первоначальных напряжений равны: вертикальное $\sigma_{верт.}$= -3,0±0,3МПА, продольное $\sigma_{пр}$=-4,4±1,0 МПа, поперечное $\sigma_{п}$=-4,9±0,7 МПа (знак «минус» обозначает сжатие горных пород).

Величины напряжений аппроксимируются выражениями: вертикальные - $\sigma_в=1,1\gamma\cdot H$; горизонтальные, действующие по простиранию рудных тел (продольные) - $\sigma_{пр}=1,46\gamma\cdot H$; горизонтальные, действующие вкрест простирания жил (поперечные) - $\sigma_п=1,63\gamma\cdot H$. Горизонтальное продольное и поперечное напряжение превышает вертикальное вследствие наличия в горном массиве значительных напряжений тектонического происхождения.

Установлено, что природные напряжения массива горных пород линейно зависят от глубины разработки Н и аппроксимируются формулами:
для глубин 40…130 м
-вертикальное напряжение σ=- 0,027Н–0,023 (R^2=0,98); (4)
-горизонтальное продольное напряжение σ=-0,040Н–0,046 (R^2=0,98); (5)
-горизонтальное поперечное напряжение σ=-0,045Н–0,05 (R^2=0,98). (6)
для глубин 170…300 м
-вертикальное и горизонтальное продольное напряжения
σ=- 0,026Н–0,036 (R^2=0,99) (7)
- горизонтальное поперечное напряжение σ=-0,043Н–0,21 (R^2=0,99) (8)

Исследования первоначального природного поля напряжений *Стрельцовского рудного поля* проводили *на месторождениях Юбилейное, Стрельцовское (участки Западный и Глубинный), Антей и Мало-Тулукуевское.* Всего проведено 103 измерения в 103 разгрузочных щелях.

В среднем величины напряжений на месторождениях Стрельцовского рудного поля на глубинах 300…900 м аппроксимируются формулами вертикальные - $\sigma_в= \gamma H$; горизонтальные по простиранию рудных тел (продольные) -$\sigma_{пр}= 1,1\gamma H$; горизонтальные вкрест простирания жил (поперечные) -$\sigma_п= 1,3\ \gamma H$. Горизонтальное продольное и поперечное напряжение также превышает вертикальное вследствие наличия в горном массиве напряжений тектонического характера.

Выявлено, что природные напряжения массива также линейно зависят от глубины горных работ Н и аппроксимируются формулами:
-вертикальное напряжение σ=-1,53Н–5,95 (R^2=0,96); (9)
-горизонтальное продольное напряжение σ=-0,71Н–9,25 (R^2=0,95); (10)

-горизонтальное поперечное напряжение σ=-2,75Н–3,89 (R^2=0,96). (11)

Установленные зависимости (4-11) можно использовать для расчета параметров конструктивных элементов систем разработки в аналогичных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Из практики отработки маломощных пологих и наклонных рудных тел с изменчивой конфигурацией выработанного пространства известно, что, например, в вогнутых местах (прогибах), а также выпуклых породы кровли находятся в различном состоянии. В этой связи на Бом-Горхонском руднике были проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния массива в натурных условиях методом щелевой разгрузки (было установлено по 20 станций в кровле камер и междукамерных целиках).

Средние значения продольных и поперечных напряжений в кровле камер соответственно равны $\sigma^{ср.}_{пр}$=-0,85±1,7 МПа и $\sigma^{ср.}_{п}$=-4,53±2,3 МПа. В связи с тем, что горизонтальное поперечное напряжение значительно превышает горизонтальное продольное, расчет устойчивости кровли осуществляется по большим напряжениям. При этом установлено, что в вогнутой части $\sigma_n^{вогн.}=1,2\cdot\sigma^{ср}_n$, а в выпуклой $\sigma_n^{выпукл.}=0,8\cdot\sigma^{ср}_n$.

Среднее значение вертикальных напряжений в междукамерных целиках равно $\sigma^{в}_{ср.}$=-12,1±6,5 МПа. При этом в вогнутой части $\sigma^{в}_{вогн.}=1,27\cdot\sigma^{в}_{ср.}$, а в выпуклой $\sigma^{в}_{выпукл.}=0,73\cdot\sigma^{в}_{ср}$.

Установленные коэффициенты в вышеприведенных выражениях рекомендуется использовать при определении расчетных напряжений в междуэтажных и междукамерных целиках, кровле очистных камер в аналогичных горно-геологических и горнотехнических условиях при нелинейной форме выработанного пространства.

3. Эффективное применение в геотехнологиях раздробленной горной массы обеспечивается использованием в геомеханических расчетах установленных прочностных и деформационных свойств в зависимости от гранулометрического состава и прилагаемой нагрузки и учета её влияния на напряженно-деформированное состояние природных и техногенно измененных массивов горных пород и устойчивость технологических обнажений.

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых существуют технологии, когда в выработанном пространстве могут находиться обрушенные вмещающие породы или породная закладка, либо отбитая руда (системы с магазинированием, блочное подземное выщелачивание (БПВ)). *При открытой и физико-химической (кучное выщелачивание (КВ))геотехнологиях* проблемами являются определение устойчивых параметров рудных и породных отвалов, а также штабелей КВ. Поэтому важно знать особенности изменения механических свойств пород и их влияние на напряженно-деформированное состояние окружающего массива.

Важнейшими из них являются коэффициент Пуассона μ, модуль деформации E, сцепление C и угол внутреннего трения φ раздробленных скальных пород. Известно достаточно много работ по изучению механических свойств грунтов, а массива скальных разрушенных пород практически недостаточно для получения каких либо обобщающих выводов и использования в практических расчетах.

Для получения более достоверных результатов испытания механических свойств проведены на большеразмерном стенде, представляющем собой лоток для размещения в нём руды и силовые рамы для восприятия реактивной нагрузки. Размеры стенда (лотка) в плане 2,52×2,52 м, высота емкости для загрузки руды – 1,57 м, высота силовых конструкций над емкостью – 0,90 м.

Значения коэффициента Пуассона, модуля деформации, сцепления и угла внутреннего трения определяли соответственно методами ленты (К. Терцаги), штамповых испытаний и среза целиков (ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости).

Исследования проведены на следующих рудах: отсортированные руды классов крупности -100+30 мм, -30+0 мм, -100+0 мм с отвала «Северный» (месторождение «Октябрьское» Стрельцовского рудного поля); руда от скважинной отбойки (подземный урановый рудник №1, месторождение «Антей»); руда от мелкошпуровой отбойки (подземный урановый рудник №8, месторождение «Мало-Тулукуевское»); комбинация мелкой (-30+0 мм) и средней (-100+30 мм) фракций отсортированных руд.

Пробы руд представлены преимущественно трахидацитами, их туфами, в меньшем количестве - андезито-базальтами, базальтами.

Коэффициент Пуассона находили по известной формуле (К. Терцаги, Н.А. Цытович) в условиях невозможности бокового расширения:

$$\mu=\xi/(1+\xi) \qquad (12)$$

где ξ - коэффициент бокового давления, определяемый по формуле:

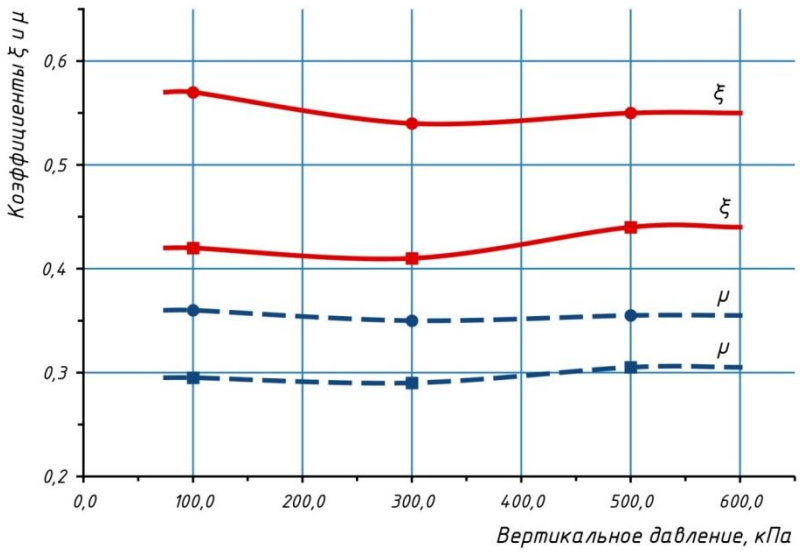
$$\xi=T_Г/T_В=(2fA\sigma_x/(2fA\sigma_z)=\sigma_x/\sigma_z \qquad (13)$$

где $T_г$ – усилие выдергивания горизонтально расположенной ленты; $T_в$ – усилие выдергивания вертикально расположенной ленты; f – коэффициент трения ленты (сталь) по грунту; A – площадь ленты; σ_x– горизонтальное давление; σ_z– вертикальное давление.

Зависимости коэффициентов ξ и μ от вертикального давления и класса крупности показаны на рисунке 2.

Из графика видно, что существенное влияние на величины коэффициентов бокового давления и Пуассона оказывает гранулометрический (фракционный) состав руды (снижаются с ростом крупности кусков руды) и незначительное - вертикальное давление. В целом коэффициент Пуассона раздробленных скальных пород больше, чем его значение в массиве.

Исследования процесса деформируемости раздробленной скальной породы, а именно определения модуля деформации как параметра, характеризующего остаточные деформации при статическом нагружении, были проведены вначале в помещении ЦНИЛ ПАО «ППГХО» (I серия), а затем на участке рудосортировки (II серия). Во втором случае лоток был установлен в котловане и обвалован с наружной стороны породой. Это позволило передавать на исследуемый материал более значительные по величине нагрузки. Все испытания проводили с рудами в рыхлоотсыпанном состоянии.



- коэффициент Пуассона; - коэффициент бокового давления;
● - класс -30 мм; ■ - класс -100+30 мм.

Рисунок 2 - Зависимости коэффициентов бокового давления ξ и Пуассона μ от вертикального давления и крупности кусков

Модуль деформации определяли по формуле:

$$E=(1-\mu^2)K_pK_1D(\Delta P/\Delta S), \text{ МПа} \quad (14)$$

где K_p - коэффициент, зависящий от заглубления штампа; K_1 - коэффициент, принимаемый в зависимости от формы штампа; D - диаметр штампа, м; ΔP - приращение давления на штамп, МПа; ΔS - приращение осадки штампа, соответствующее ΔP, м; μ - коэффициент Пуассона.

Графическое изображение зависимостей «осадка штампа – давление на породу» и результаты расчетов модуля деформации приведены на рисунках 3,4 и в таблицах 2-4.

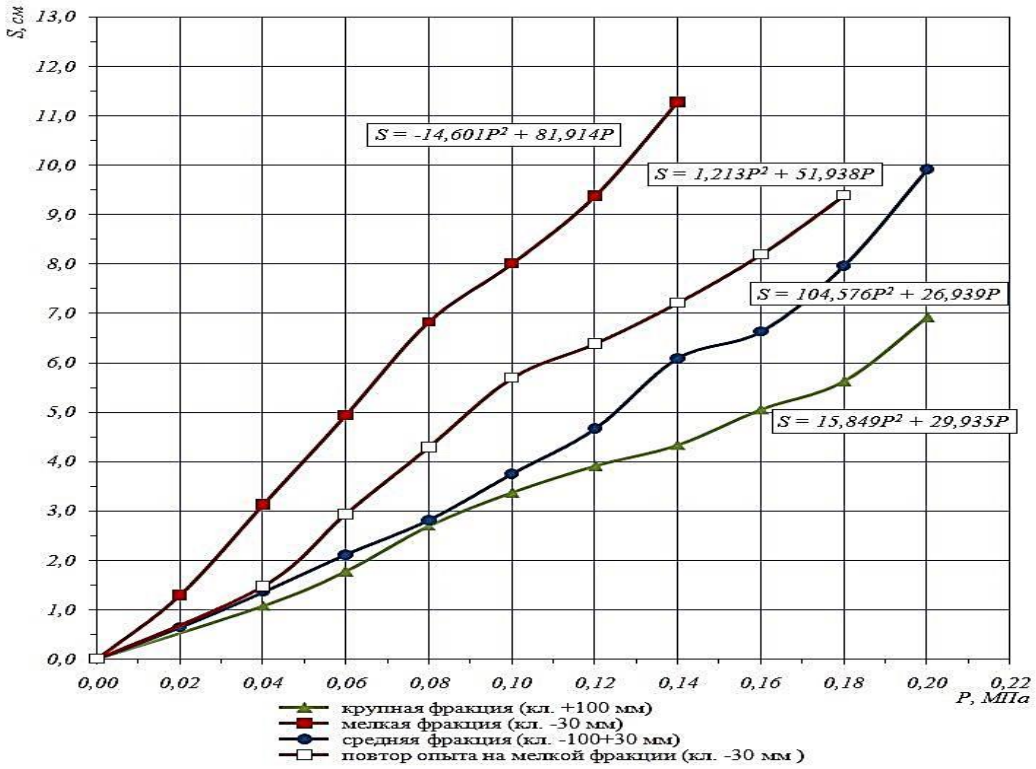


Рисунок 3 - Изменение деформируемости руд в зависимости от гранулометрического состава и величины нагрузки (I серия опытов)

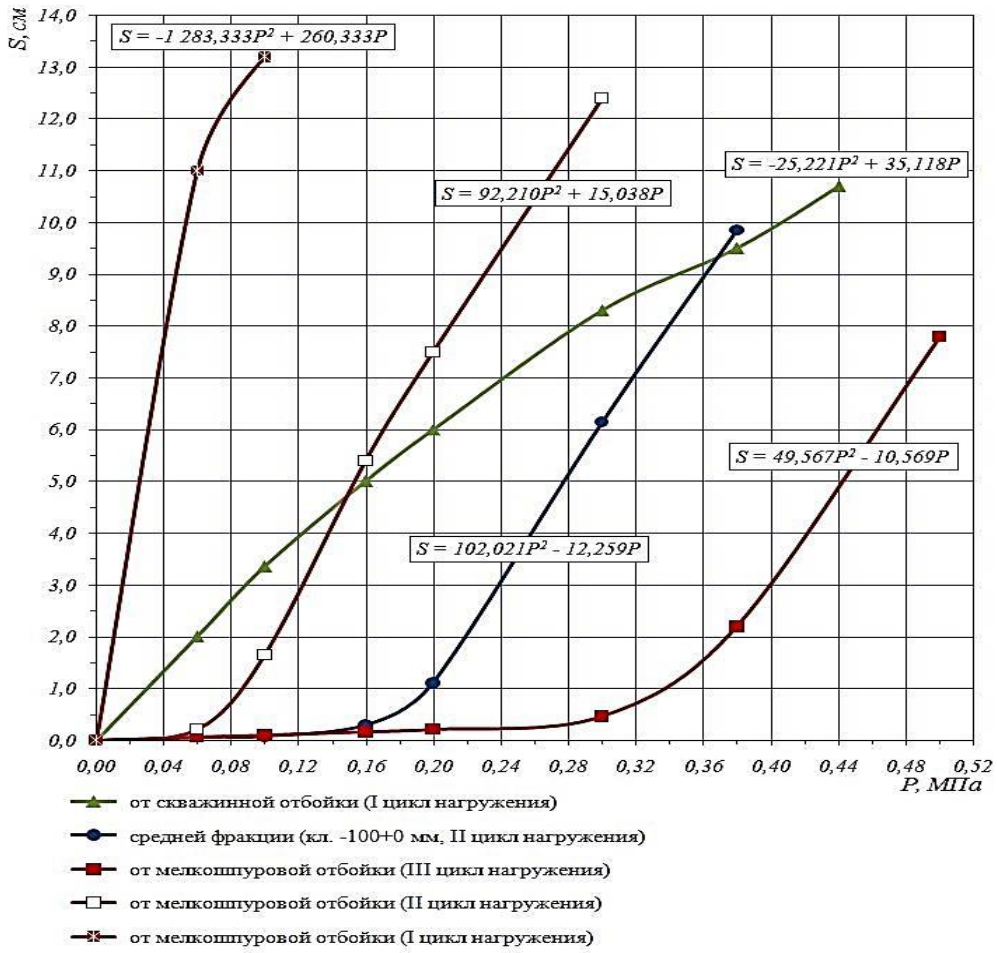


Рисунок 4 - Изменение деформируемости руд в зависимости от гранулометрического состава и величины нагрузки (II серия опытов)

Таблица 2 - Результаты штамповых опытов с крупной фракцией

Диапазоны нагружения руды, кгс/см^2 (МПа)	II серия опытов (руда от скважинной отбойки) *E*, кгс/см^2 (МПа)	I серия опытов (руда класса крупности +100 мм) *E*, кгс/см^2 (МПа)
	I цикл	I цикл
0,6-1,0 (0,06-0,1)	11,5 (1,15)	10,06 (1,0)
1,0-1,6 (0,1-0,16)	15,1 (1,51)	14,37 (1,44)
1,6-2,0 (0,16-0,2)	16,1 (1,61)	16,1 (1,61)
2,0-3,0 (0,2-0,3)	17,5 (1,75)	-

Таблица 3 - Результаты штамповых опытов с мелкой фракцией

Диапазоны нагружения руды, кгс/см^2 (МПа)	II серия опытов (руда от мелкошпуровой отбойки) *E*, кгс/см^2 (МПа)			I цикл, I серия опытов (руда класса крупности -30+0 мм) *E*, кгс/см^2 (МПа)
	I цикл	II цикл	III цикл	I цикл
0,6-1,0 (0,06-0,1)	1,3 (0,13)	5,8 (0,58)	458 (45,8)	4,99 (0,49)
1,0-1,6 (0,1-0,16)	-	6,23 (0,62)	389 (38,9)	7,67 (0,77)
1,6-2,0 (0,16-0,2)	-	7,4 (0,74)	311 (31,1)	10,3 (1,03)
2,0-3,0 (0,2-0,3)	-	7,95 (0,79)	300 (30,0)	29,6 (2,96)

Таблица 4 - Результаты штамповых опытов со средней фракцией

Диапазоны нагружения руды, кгс/см^2 (МПа)	II серия опытов (комбинация руд мелкой и средней фракций, класс крупности -100+0 мм) *E*, кгс/см^2 (МПа)	I серия (руда класса крупности -100+30 мм) *E*, кгс/см^2 (МПа)
	II цикл	I цикл
0,6-1,0 (0,06-0,1)	161 (16,2)	9,75 (0,98)
1,0-1,6 (0,1-0,16)	155 (15,5)	8,35 (0,84)

Характер деформирования руд различного гранулометрического состава имеет существенные отличия. Так, например, для руд крупной фракции в пределах исследуемого диапазона давлений на руду в обеих сериях опытов установлено монотонное увеличение модуля деформации на 34…38%, что свидетельствует о незавершенности фазы уплотнения для исследуемых руд. Аналогичные результаты получены для руд мелкой фракции в I серии опытов I цикла испытаний и во II серии опытов II цикла. Для III цикла нагружения руды от мелкошпуровой отбойки II серии опытов установлено некоторое уменьшение модуля деформации руды (на 35%) с увеличением на нее давления, что вероятно свидетельствует о наступлении фазы сдвигов, т.е. переупаковки кусков раздробленной руды. Подобные результаты получены для руд средней фракции во II серии опытов при II цикле нагружения руды.

Исследования прочностных свойств (сцепления и угла внутреннего трения) также были проведены в две серии. Результаты приведены на рисунках 5,6.

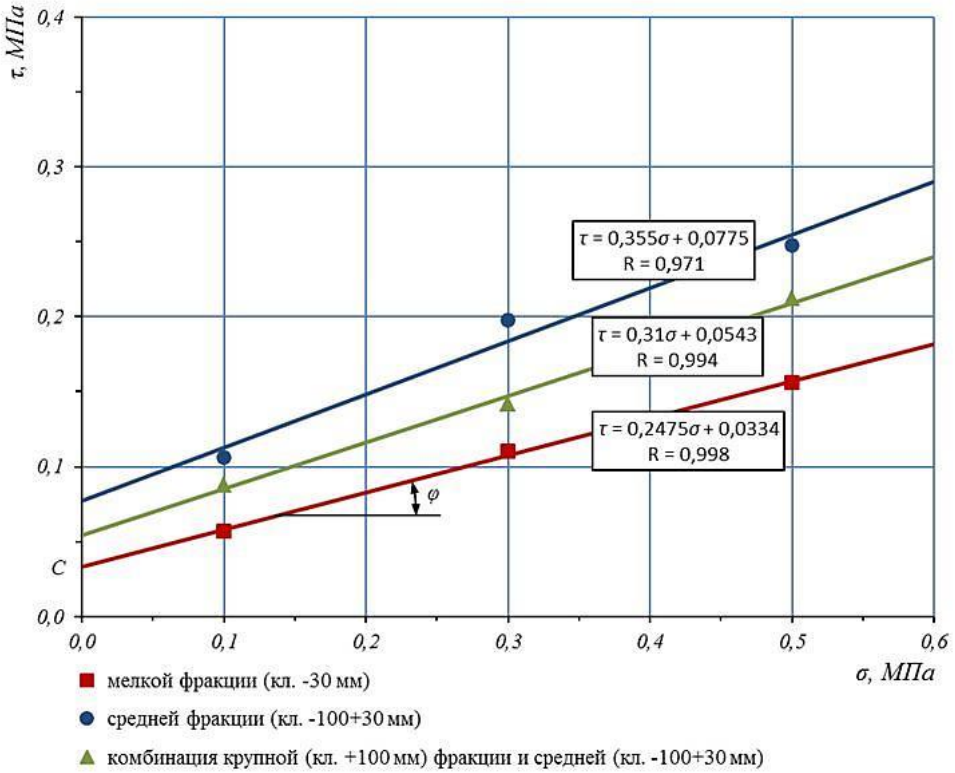


Рисунок 5 - Изменение прочности на срез, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от гранулометрического состава и величины нагрузки (I серия опытов)

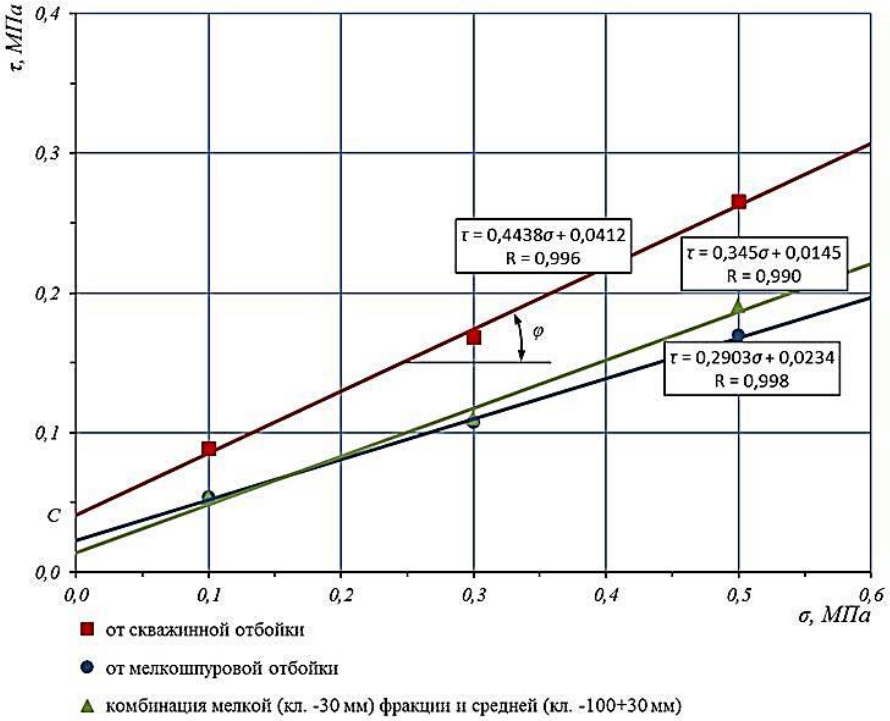


Рисунок 6 - Изменение прочности на срез, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от гранулометрического состава и величины нагрузки (II серия опытов)

Показатели прочностных, как и деформационных свойств, раздробленных скальных руд в целом имеют существенно низкие значения, что обусловлено их высокой сжимаемостью и низким сопротивлением срезу в рыхлоотсыпанном состоянии. При этом имеет место закономерное возрастание исследуемых характеристик прочности с увеличением средневзвешенного размера куска.

Исследование влияния отбитой руды в выработанном пространстве на напряженно-деформированное состояние и устойчивость массива горных пород проведены применительно к отработке запасов в дне и бортах карьера Тулукуевского месторождения как физико-технической геотехнологией, так и физико-химической - методом БПВ и КВ (рисунок 7).

Всего промоделировано десять возможных состояний (по трем разведочным линиям): борта карьера без влияния подземной камеры, борта карьера с расположенными в днище очистными камерами (открытой и замагазинированной отбитой рудой), карьер не заполнен рудой, заполнен на треть, две трети и полностью заложенный.

Моделирование осуществляли методом конечных элементов по программному комплексу FEM, разработанному доктором технических наук, профессором Зотеевым О.В. (ИГД УрО РАН). Исходными данными для моделирования были значения первоначальных напряжений горного массива и физико-механические свойства раздробленной руды (приняты по результатам исследований, изложенных выше), геометрическое положение горных выработок (глубина горных работ, формы и размеры камер).

В результате моделирования установлено следующее. Главные напряжения в приконтурном массиве карьера имеют сжимающий характер. Зона влияния горных работ вблизи бортов нижних уступов и подошвы

карьера составляет порядка 7,0…10,0 м, глубже этой зоны напряжения близки к первоначальным.

Рисунок 7 - Схема расположения камеры под карьером (разрез по разведочной линии 38)

Борта и дно карьера при открытой очистной камере находятся в устойчивом состоянии. В связи с высокими напряжениями в почве камеры на горизонте выпуска необходимо проводить мероприятия по обеспечению устойчивости горных выработок. Зона влияния камеры в почве достаточно велика и сопоставима с её размерами (10…20 м и более). Величина растягивающей зоны в стенках очистной камеры и борту уступа карьера не превышает 1…3 м. При оставлении руды в очистной камере борта и дно карьера находятся также в устойчивом состоянии. Наличие в выработанном пространстве замагазинированной руды не существенно снижает напряжения на его стенках (с 1…7 до 3…5 МПа), но происходит значительное уменьшение их в почве камер (с 50…70 МПа до 24…40 МПа). Борта и дно карьера после различных степеней заполнения его дробленой рудой для выщелачивания будут находиться в устойчивом состоянии. Главные, а также горизонтальные и вертикальные напряжения при незаполненном и заполненном на треть карьере практически одинаковы. Однако при заполнении карьера на две трети и полностью максимальные сжимающие и горизонтальные напряжения увеличиваются почти в 2 раза, а минимальные сжимающие и вертикальные - в 1,3…1,7 раза. Прирост напряжений обусловлен весом заполненной руды.

Результаты оценки устойчивости бортов карьера и подземных выработок инструментальными (метод полигонометрических ходов – по величине смещения пунктов полигонометрии и критической деформации горного массива) и геофизическими (электротомография – по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) пород) исследованиями согласуются с данными моделирования НДС массива методом конечных элементов, представленного трахидацитами средней трещиноватости.

4. Эффективное применение системы с магазинированием при отработке маломощных крутопадающих жил в условиях значительного горного давления и недостаточно устойчивых вмещающих породах достигается временным оставлением в выработанном простран-

стве вертикального столба из отбитой руды, образованного поверхностями эллипсоидов выпуска, соответственно деформация и устойчивые размеры которых определяются в зависимости от коэффициента разрыхления и влажности руды, угла падения и мощности залежи, ширины рудного столба.

В системах с магазинированием при отработке маломощных крутопадающих жил актуальным является оценка особенностей выпуска руды из узкого очистного пространства («узкого магазина») и её способности воспринимать нагрузки, деформируясь без разрушения.

Лабораторные исследования процесса выпуска руды проведены на физической модели в масштабе 1:25 с соблюдением основных критериев подобия. Модель загружали сульфидной рудой, гранулометрический состав которой в масштабе 1:25 соответствовал руде, добытой при шпуровой отбойке на участке Восточный Дарасунского рудника (+1-2 мм) -31%; (+2-4 мм) - 13%; (+4-8 мм) - 15%; (+8-12 мм) - 21%; (+12-20 мм) - 20%.).

В качестве критериев оценки процесса приняты размер, форма эллипсоидов выпуска и площадь зависания. Переменными факторами были коэффициент разрыхления $К_р$ (1,5; 1,4; 1,2), влажность руды W (1, 3 и 5%), угол падения залежи α (70 и 90^0) и ширина очистного пространства m (1,0; 1,5; 2,0 м).

При проведении исследований были получены следующие результаты. С увеличением коэффициента разрыхления наблюдалось уменьшение площади столбообразного зависания и соответственно увеличение площади эллипсоида выпуска, причем максимальная сыпучесть руды имела место при влажности 1%. При увеличении влажности от 1 до 3% сыпучесть уменьшалась, а от 3 до 5% происходило её увеличение в связи с повышением текучести руды (рисунок 8).

W=1% W=3% W=5%

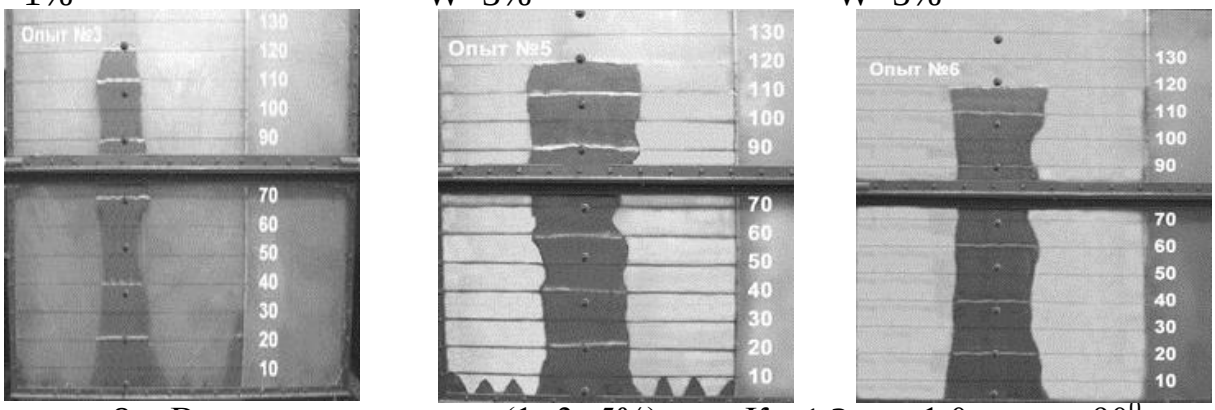


Рисунок 8 - Влияние влажности (1, 3, 5%) при $К_р$=1,2, m=1,0 м и α=90^0на размер, форму эллипсоидов выпуска и площадь зависания

Графики зависимости площади столбообразного зависания (Sст) и эллипсоида выпуска (Sэл) от $К_р$ при различной влажности руды приведены на рисунке 9. При угле падения залежи 90° выпуск руды шел неравномерно, фигуры выпуска формировались трубообразной формы. При меньшем угле падения 70° зона потока развивалась вдоль висячего бока. Руда у лежачего бока оставалась практически неподвижной. В целом, при выпуске наблюдалась сегрегация руды по крупности. При наклоне, близком к углу естественного откоса, выпуск руды прекращался.

При изменении коэффициента разрыхления с 1,5 до 1,2 выпуск руды ухудшался, эллипсоиды развивались неправильной трубообразной формы, а столб руды становился устойчивее.

а) б)

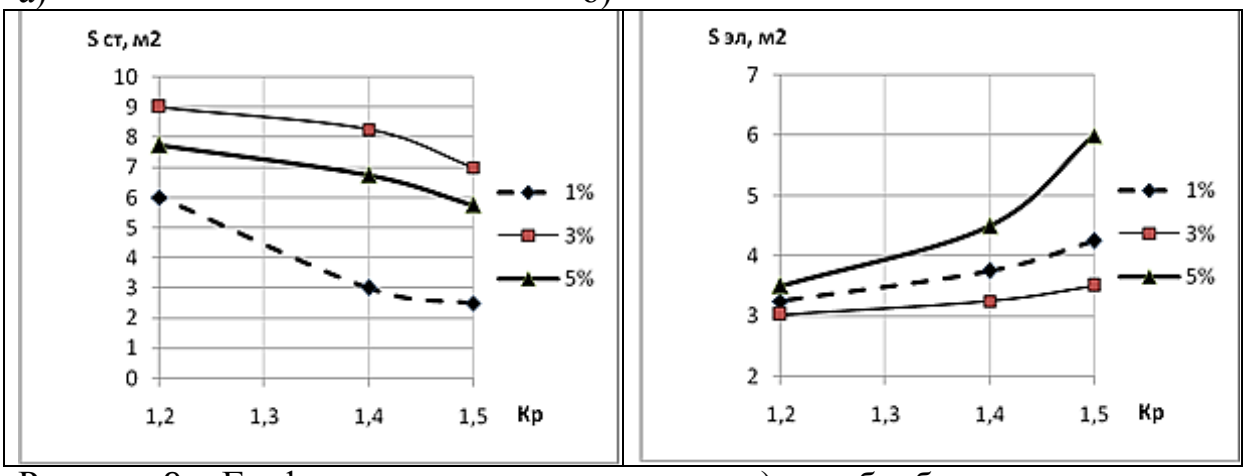


Рисунок 9 - Графики зависимости площади а) столбообразного зависания (Sст) и б) эллипсоида выпуска (Sэл) от коэффициента разрыхления ($К_р$) при различной влажности руды 1%, 3% и 5%

С увеличением ширины очистного пространства уменьшалось сцепление частиц руды между собой и боковыми стенками блока, сыпучие свойства руды улучшались, выпуск проходил равномерно и фигуры выпуска приобретали более правильную форму. При этом площадь зависания уменьшалась, а эллипсоида выпуска увеличивалась.

Процесс выпуска руды при других условиях (поясняющие фотографии), графики зависимости ширины столбообразного зависания (b ст.) и эллипсоидов выпуска (bэл.) от ширины очистного пространства (m) при $К_р$=1,2, W= 3%, а также от угла падения (α) при аналогичных $К_р$, W и ширины очистного пространства (m)=1,0 м приведены в диссертации.

Таким образом, установлено, что в исследуемых интервалах практически при всех значениях исследуемых факторов образуются устойчивые столбообразные зависания. Причем, наиболее неблагоприятные условия для выпуска руды имеют место при m=1,0 м, W=3% и α=80…90°.

По результатам исследований получено методом наименьших квадратов уравнение множественной регрессии с коэффициентом детерминации 0,86, описывающее изменение ширины эллипсоида выпуска ($b_{эл}$) в зависимости от коэффициента разрыхления (K_p), влажности (W), ширины очистного пространства (m) и угла падения (α):

$$b_{эл}= 2,8 + 3,48K_p + 0,19W + 1,1m - 0,065\alpha \qquad (15)$$

Полученное уравнение адекватно описывает воспроизводимый процесс. Средняя абсолютная и относительная ошибки ширины эллипсоида выпуска между расчетными и экспериментальными данными составляют соответственно 0,4 м и 8,4% (максимум 24,3% и минимум 0,5%).

Исследования процесса деформирования и разрушения руды под нагрузкой проведены на физической модели блока в масштабе 1:25, изготовленной из двух металлических пластин толщиной 6 мм, фиксируемых на определенном расстоянии друг от друга с помощью 4 болтов. Габаритные размеры - 297х420 мм. Параметры модели приняты исходя из разме-

ров зоны устойчивых зависаний, формирующихся, как показывает практика, преимущественно в центральной части блока (по А.И. Соболеву). Исследованию подвергалась та же руда, что и при выпуске из «узкого магазина».

При проведении экспериментов изменяли ширину очистного пространства (1; 1,5 и 3,0 м), а также столба из отбитой руды (3, 5 и 7 м), её влажность W (1, 3 и 5%). Давление на руду в модели осуществляли 50 тонным прессом с нагрузкой 2,0; 5,0; 20,0 и 47,5 тс. При этом замеряли мощность и площади сжатой руды, а так же рассчитывали её коэффициент разрыхления. Всего проведено 45 опытов, часть из которых, для получения более достоверных результатов, дублировалась.

При обработке экспериментальных данных получены следующие основные результаты. При сжатии образца в его центральной части образуется уплотненное ядро, что свидетельствует о воспроизводстве в модели натурных условий. С увеличением мощности возрастала относительная продольная деформация вследствие уменьшения сил сцепления частиц руды между собой и стенками модели. Она составила 0,28, 0,39 и 0,35 при ширине очистного пространства соответственно 1,0;1,5 и 3,0 м. Наилучшее сцепление частиц руды между собой наблюдалось при влажности 3% - относительная продольная деформация составила 0,32, коэффициент разрыхления 1,1 (рисунок 10а). При влажности 1 и 5% отмечалось снижение сцепления частиц руды и увеличение ее текучести – относительная продольная деформация составила соответственно 0,36 и 0,34, а коэффициент разрыхления 1,3 и 1,2. Причем при влажности 5% и максимальной нагрузке 47,5 тс происходило выдавливание из раздробленной руды излишков воды. Уменьшение ширины столба из отбитой руды вызывало увеличение относительной продольной деформации с 0,29 до 0,4 и снижение коэффициента разрыхления с 1,3 до 1,1.

а) б)

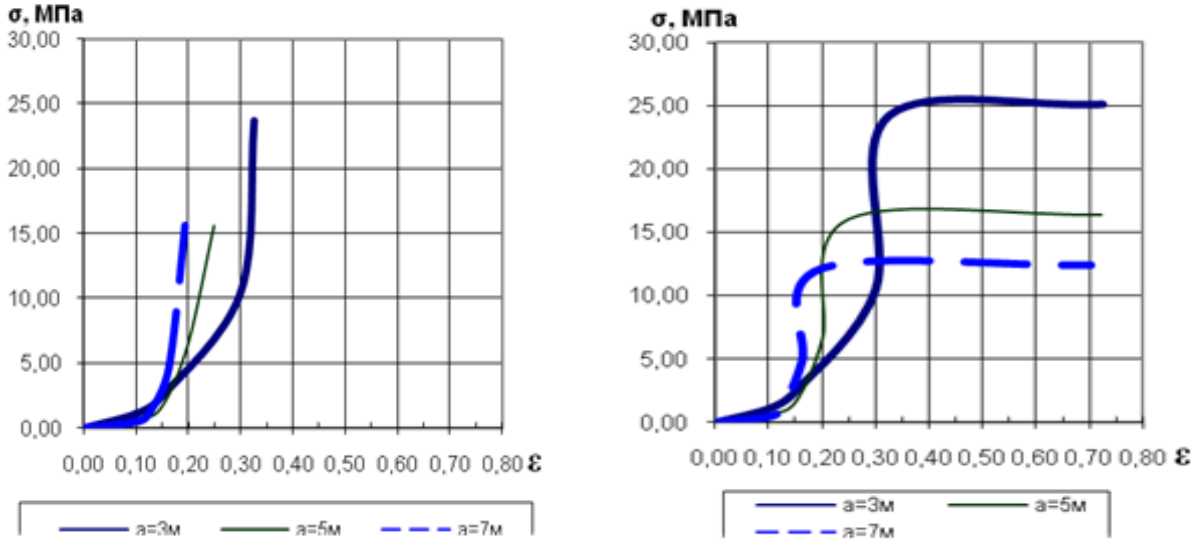


Рисунок 10 - Графики зависимости относительной продольной деформации (ε) от ширины рудного столба (а) под нагрузкой, при мощности 1м и влажности 3%: а) - до насыщения водой; б) - после насыщения водой.

Зависимость относительной продольной деформации (ε) от нагрузки (σ) и ширины рудного столба *(а)* имеет вид:

$$\varepsilon = 0{,}24 + 0{,}006\,\sigma - 0{,}02a \qquad (16)$$

Полученное уравнение адекватно описывает воспроизводимый процесс. Коэффициент корреляции составляет 0,85, а погрешность расчетов - ±0,04.

Таким образом, установленные закономерности и особенности деформирования позволяют сделать вывод о том, что оставление в выработанном пространстве столбообразных участков руды технически возможно и позволяет управлять горным давлением.

Выемка временно замагазинированной в очистном пространстве руды производится следующими способами в зависимости от её коэффициента разрыхления. При $К_р$=1,4…1,5 разрушение осуществляется путем её насыщения водой сверху вниз, что приводит к уменьшению коэффициента внутреннего трения и возрастанию текучести руды (рисунок 10б). При $К_р$=1,3 воду необходимо подавать под давлением по перфорированному трубопроводу, расположенному в центре рудного столба либо разрушать водовоздушной смесью под давлением с помощью, например, гидропневматической установки ликвидации зависаний (ГПЛЗ-2), разработанной ИПКОН АН СССР и Читинским филиалом ВНИПИгорцветмет. При $К_р$=1,2…1,3 разрушение уплотненной руды осуществляется с помощью малогабаритной установки высоконапорного гидроразмыва. При $К_р$=1,2…1,02 выемку руды из столба необходимо производить путем взрывания зарядов ВВ в трубопроводе или с помощью динамо-реактивных снарядов (ДРС). Возможно сочетание названных способов разрушения.

5. Совершенствование технологии отбойки руды при разработке сложноструктурных месторождений осуществляется применением шпуровых или скважинных параллельно сближенных зарядов, щелевой либо валовой выемки руды с перераспределением энергии ВВ в разрушаемом массиве в зависимости от горно-геологических, горно-технических и технологических факторов.

Главной особенностью сложноструктурных, особенно маломощных, как крутопадающих, так и пологих и наклонных жильных месторождений, является то, что на выбор геотехнологии и её параметров большое влияние оказывает морфология рудных тел, определяемая условиями их генезиса. Поэтому одной из важнейших задач при выемке жил с изменчивыми элементами залегания является определение способа отбойки (шпурами или скважинами)

Интегральной характеристикой сложности строения рудного тела принят модуль сложности ($\mu_{ж}$):

$$\mu_{ж} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (hi / li + hi / mi)}{N} + 0{,}121 \qquad (17)$$

где N – количество единичных изгибов жилы на участке длиной L; h_i – отклонение оси жилы от оси отбиваемого участка (прирезки), м; l_i – длина хорды единичного участка, м; m_i – мощность рудного тела на единичном участке, м; 0,121 – доля прирезаемых пустых пород к мощности жилы, при которой обеспечивается максимальная полнота выемки (по Четверикову Л.И.).

Модуль сложности ($\mu_{ж}$) учитывает не только радиус кривизны руд-

ного тела, но и его мощность, и степень изменчивости элементов залегания. Допустимая по условиям полноты выемки балансовых запасов прирезки глубина скважин (шпуров) ($l_б$) связана с модулем сложности ($\mu_ж$) на отбиваемом участке гиперболической зависимостью вида: $l_б = 8{,}41\mu_ж^{-1}$ (рисунок 11).

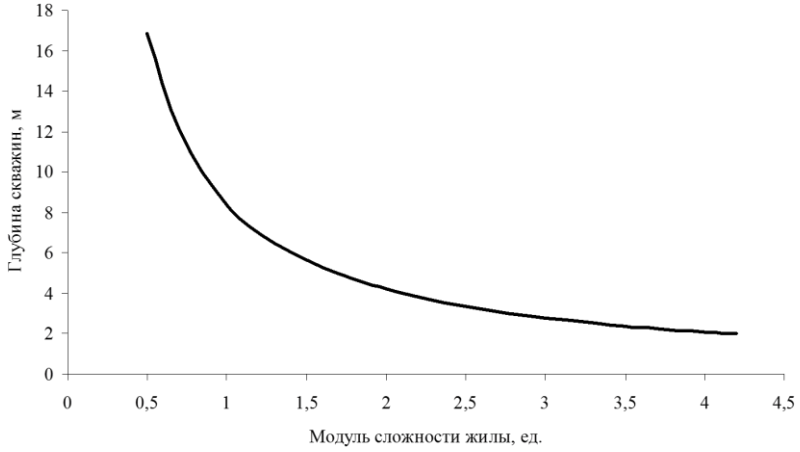


Рисунок 11 - Зависимость предельной глубины скважин (шпуров) от модуля сложности жилы

Полученная методом наименьших квадратов эмпирическая зависимость может быть использована для расчета величины $l_б$ при изменении модуля сложности от 0,5 до 4,2. Из рисунка видно, что при модуле сложности жилы от 1,5 до 4,2 необходимо применять отбойку руды шпурами глубиной до 5 м, а при модуле менее 1,5 – скважинную отбойку.

На сильно искривленных участках жильных рудных тел (с радиусом кривизны до 5…6 м) во избежание потерь и значительного разубоживания руды применяется шпуровая отбойка с длиной прирезки (глубиной шпуров) 2…4 м, что значительно снижает технико-экономические показатели очистной выемки.

Одним из реальных путей улучшения технико-экономических показателей отработки сложноструктурных маломощных залежей с изменчивой морфологией является замена шпуровой отбойки на более производительную скважинную (параллельными или параллельно сближенными зарядами) без снижения количества и качества выдаваемой руды. Это достигается путем увеличения длины прирезки с последующей двойной рудосортировкой горнорудной массы в шахте либо на поверхности. При этом вначале она сортируется на грохотах по классам крупности и содержанию, а затем на рентгенорадиометрических сепараторах. В результате чего разубоживание руды снизится в целом на 40…42%, т.е. коэффициент обогащения при рудосортировке составит $K_{орс}$=1 - (0,4…0,42) = 0,58…0,6 (патент РФ №2659107).

На рисунке 12 приведена расчетная схема для определения длины прирезки при скважинной отбойке рудных тел с модулем сложности более 1,5. Схема отбойки предусматривает практически 100% извлечение полезного ископаемого. Это достигается вписыванием отбиваемой скважинами части рудного тела EFCD в прямоугольник ABCD, где сторона AB – это длина прирезки (глубина скважин), соответствующая длине хорды CD, а AD – ширина прирезки, которая определяется расстоянием между хордой CD и параллельно проведенной ей касательной AB к окружности.

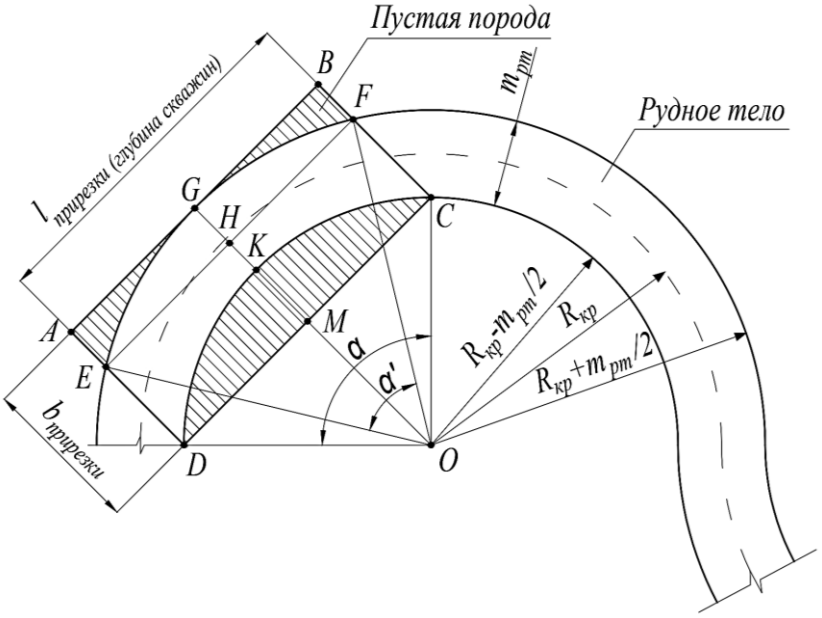


Рисунок 12 – Расчетная схема для определения длины прирезки при скважинной отбойке рудных тел с модулем сложности более 1,5: $R_{кр}$ - радиус кривизны рудного тела; $m_{рт}$ - мощность рудного тела

Длина прирезки (глубина скважин) $l_{\text{пр (гл.скв.)}}$ определяется по формуле:

$$l_{\text{пр (гл.скв.)}} \geq Me/(b_{\text{пр}} * m_{\text{рт}} * \rho * a_{min} * K_{\text{орс}})\ ,\text{м}, \qquad (18)$$

где Me – количество металла в прирезке, кг (т); $b_{\text{пр}}$ – ширина прирезки, м; $m_{\text{рт}}$ – мощность рудного тела, м; ρ – плотность руды в массиве, т/м^3; a_{min} – минимально допустимое содержание полезного компонента в горнорудной массе, поступающей на обогатительную фабрику (гидрометаллургический завод), %; $K_{\text{орс}}$ – коэффициент обогащения при рудосортировке.

Минимально допустимое содержание полезного компонента a_{min} определяется из условия с учетом затрат на рудосортировку по формуле:

$$a_{min} = (C_{\text{рс}} + C_{\text{пер}})/(0{,}01 * \text{Ц}_{\text{о}} * \text{И}_{\text{пер}}),\%, \qquad (19)$$

где $C_{\text{рс}}$ – затраты на рудосортировку, р/т; $C_{\text{пер}}$ – затраты на переработку на обогатительной фабрике или гидрометаллургическом заводе, р/т; $\text{Ц}_{\text{о}}$ – оптовая цена металла в концентрате, р/т; $\text{И}_{\text{пер}}$ – извлечение полезного компонента в концентрат на обогатительной фабрике или гидрометаллургическом заводе, д.ед.

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии отбойки руды является применение параллельно сближенных шпуровых или скважинных зарядов.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложена гипотеза механизма взрыва параллельно сближенными зарядами ВВ и на её основе разработана методика расчета параметров БВР (радиус зоны дробления, расстояние между зарядами, линия наименьшего сопротивления).

Сущность гипотезы заключается в следующем.

При сближении зарядов ВВ между ними по линии, перпендикулярной линии зарядов, возникает зона, где горная порода сжимается от действия продуктов детонации (ПД) радиальными напряжениями (рисунок 13). В результате они преобразуются в тангенциальные через соотношение коэффициента Пуассона и дополнительно воздействуют на окружающий массив, увеличивая радиус зоны его разрушения по линии ЛНС. Располо-

жение радиальных и тангенциальных напряжений и результирующего их действия приведено на рисунке 13.

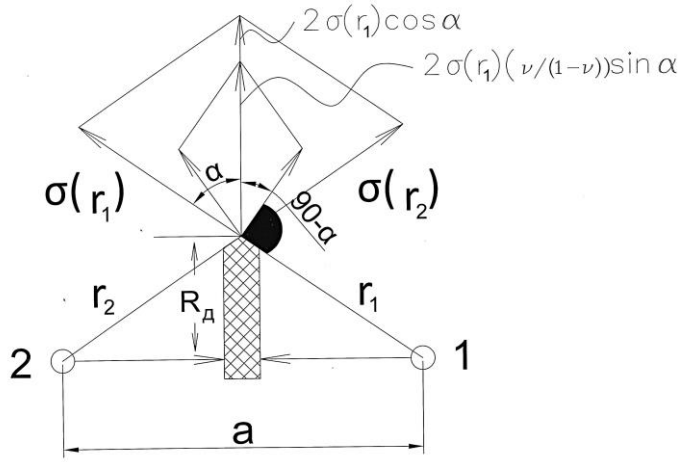


Рисунок 13 - Схема распределения напряжений при взрыве параллельно сближенных зарядов ВВ с учетом эффекта упругой реакции массива: 1, 2 – заряды ВВ; $2\sigma(r_1)\cos\alpha$ - суммарное радиальное напряжение от взрыва двух зарядов ВВ; $2\sigma(r_1)(\nu/(1-\nu))\sin\alpha$ - суммарное тангенциальное напряжение

Используя энергетическую теорию деформирования и разрушения трещиноватого массива (Кутузов Б.Н., Тюпин В.Н.), законы векторной алгебры получены выражения для определения радиуса зоны дробления ($R_д$) перпендикулярно линии зарядов с учетом влияния упругой реакции массива и расстояния между зарядами (a):

$$R_д = R_1 + \sqrt{R_1^2 + R_1\frac{a\nu}{1-\nu} - 0,25a^2} \qquad (20)$$

где R_1 – радиус зоны дробления трещиноватого напряженного горного массива взрывом одиночного заряда ВВ, определяемый по формуле (В.Н. Тюпин):

$$R_1 = \frac{\sqrt{\pi}}{8}\frac{D\rho_в d_з c\nu\left(1-\frac{\mu\nu}{1-\nu}\right)}{\left(\sigma_p + \mu P\right)\Phi\left(1-\nu\right)}\sqrt{\frac{2d_c}{d_e}} \qquad (21)$$

где $D, \rho_в, d_з$– соответственно скорость детонации, плотность ВВ, диаметр заряда ВВ; c, ν, σ_p– соответственно скорость продольной волны, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв отдельности; μ, Φ, d_e– соответственно коэффициент трения между отдельностями, показатель трещиноватости массива, размер отдельности; d_c– средний размер куска; P– величина горного давления.

Зависимость(20) имеет смысл при $a < 2\left(R_1\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) + R_1\sqrt{\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2 + 1}\right)$.

При среднем значении коэффициента Пуассона ν=0,26 для скальных горных пород выражение примет вид $a < 2,8R_1$.

Линия наименьшего сопротивления определяется по формуле:

$$W = \sqrt{2}\,R_д = 1,4R_д \qquad (22)$$

Учет эффекта упругой реакции области массива между зарядами ВВ приводит к увеличению зоны дробления на 20…30%.

Эффективность щелевой выемки руды параллельно сближенными шпуровыми и скважинными зарядами и валовой выемки руды по смешанному очистному забою с перераспределением энергии ВВ в разрушаемом массиве была установлена на основе опытно-промышленных испытаний в блоках С1-28/11 и С1-28/4 (гор. 1170 м) Бом-Горхонского рудника и 4А-

805, 4Д-709(809), 4Д-705 и 8-624 подземных рудников №1 и 8 ПАО «ППГХО».

В результате проведенных сравнительных экспериментальных взрывов щелевой выемки жилы установлено следующее: а) отбойка жилы осуществляется практически без прихвата вмещающих пород и их законтурного разрушения, что исключает первичное разубоживание и сокращает вторичное от обрушения пород кровли; б) уменьшается на 25…30% объем буровзрывных работ; в) образуется более ровный контур выработанного пространства, что благоприятно сказывается при выпуске руды и зачистке обогащенной рудной мелочи в отработанном пространстве.

При валовой выемке с увеличением энергии взрыва в отбиваемой руде и уменьшением ее в породе (при сохранении средних значений параметров БВР) получаемая кусковатость рудной массы благоприятна для последующей сортировки её на грохотах вследствие возрастания объема крупных и снижения объема мелких кусков породы.

Другим способом управления качеством руды является её сортировка по классам крупности и содержанию после отбойки шпурами или скважинами (без перераспределения энергии ВВ, т.е. обычным способом).

Для оценки возможности сортировки руды таким способом были проведены исследования пробы руды от скважинной отбойки, добытой в блоке 4Д-709. Гранулометрический состав отбитой рудной массы определяли методом ситового анализа (таблица 5).

Таблица 5 - Гранулометрический состав по крупности и содержанию бедной урановой руды (трахидациты)

Класс крупности, мм	Масса, кг	Выход, %	Содержание U, %	Металл, г
+300	774,3	9,54	0,011	88,27
-300+200	363,6	4,48	0,016	59,39
-200+100	598,5	7,37	0,030	181,49
-100+60	787,6	9,70	0,070	550,13
-60+25	1361,6	16,77	0,098	1328,47
-25+10	1359,2	16,74	0,129	1754,57
-10+5	610,6	7,52	0,142	865,73
менее 5	2078	25,59	0,177	3687,46
шлам	185,3	2,28	0,228	421,99
Итого	**8118,8**	**100,0**	**0,110**	**8937,5**

В результате установлено, что с увеличением крупности куска происходит уменьшение в нем содержания металла. В данном случае класс крупности +200 мм содержит 14% руды (1,6 % металла) со средним содержанием 0,013% урана, которая является забалансовой(<0,03%) и может быть выведена из дальнейшей переработки.

Класс крупности -200+10 мм составляет 50,6% от общей пробы (42,8 % металла). Среднее содержание урана в этом классе 0,093% и эта руда соответствует критерию беднобалансовой (0,03…0,12%). Она может быть направлена на покусковую рентгенорадиометрическую сепарацию с выделением забаланса (пустой породы) и получением более богатой руды для

переработки на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ) либо рядовой для кучного или подземного камерного выщелачивания.

В классе крупности -10 мм находится 35,4% руды (55,6% металла) с средним содержанием 0,173% урана, которое является рядовым (0,121…0,2) и близко к богатому. Этот класс направляется сразу на ГМЗ для дальнейшей переработки. Аналогичное, как показывает практика, имеет место и на других жильных месторождениях крепких руд (вольфрамовых, золотых, полиметаллических и др.), где содержание металла в мелкой фракции в 1,5…2,0 раза больше, чем в балансовой руде, а крупные негабаритные фракции с низким (забалансовым) содержанием либо являются пустой породой. Такие особенности обусловлены сложной структурой взрываемого рудного массива (неравномерное и дискретное распределение металла, различный минералогический состав, изменчивость физико-механических свойств руды и пород, наличие трещин, включений и др.).

6. Повышение производительности труда, полноты и качества выемки полезного ископаемого, безопасности труда и рентабельной разработки сложноструктурных месторождений достигается применением разработанных унифицированных технологических схем подготовки и отработки рудных тел физико-технической, физико-химической и комбинированной геотехнологиями, базирующимися на установленных закономерностях развития физических процессов отбойки, доставки, управления горным давлением и рудосортировки.

В современных условиях для эффективной и конкурентной работы горнодобывающих предприятий, разрабатывающих сложноструктурные месторождения, необходимо применение геотехнологий, обеспечивающих не только высокую производительность труда и низкую себестоимость, но и полноту и качество извлечения полезного ископаемого, а также безопасность ведения горных работ.

На основе проведенных исследований, а также тенденций развития подземных геотехнологий предложены следующие принципы построения новой геотехнологии разработки сложноструктурных месторождений:

1) количественная оценка сложности структуры месторождения;

2) применение систем разработки со сплошной выемкой или камерных (в зависимости от ценности руды и устойчивости вмещающих пород), подготовкой и нарезкой выемочных блоков буродоставочными выработками (подэтажными, слоевыми штреками либо буровыми восстающими);

3) использование для отбойки руды параллельно сближенных зарядов, обеспечивающих требуемое качество дробления, минимальное законтурное разрушение и снижение затрат на буровзрывные работы:

- селективная (щелевая) выемка тонких и маломощных рудных тел с отбойкой руды параллельно сближенными соответственно шпуровыми и скважинными зарядами малого диаметра либо валовая выемка с перераспределением энергии взрыва: увеличением в руде и уменьшением в породе и последующим отделением крупнокусковой фракции (породы) на грохоте;

- скважинная отбойка при отработке маломощных жил с нелинейной формой (модуль сложности более 1,5), залежей средней мощности и более с последующей рудосортировкой на грохотах и рентгенорадиометрических

сепараторах по классам крупности и содержанию в них полезного компонента;

4) использование серийно выпускаемого высокопроизводительного самоходного, в т.ч. малогабаритного бурового и погрузочно-доставочного оборудования при эксплуатации в очистном пространстве с углом наклона до $14^0 \ldots 16^0$ и выемочной мощности более 2,5…3 м; при меньшей мощности и больших углах падения – в подэтажных буродоставочных выработках, пройденных по руде и имеющих двойное (тройное) назначение;

5) использование комбинированной доставки руды при отработке наклонных залежей (силой взрыва в выработанном пространстве, самоходными ПДМ по подэтажным выработкам с зачисткой обогащенной рудной мелочи на почве выработанного пространства высоконапорным гидросмывом и механическим способом;

6) управление горным давлением:

- применением конструктивных параметров систем разработки, установленных с учетом особенностей проявления природных и техногенных напряжений в зависимости от геолого-морфологической изменчивости элементов залегания рудных залежей;

- использованием, наряду с известными методами (крепление очистного пространства различными видами крепи либо заполнение его твердеющей закладкой, упрочнение массива горных пород химическими составами и др.): принудительного обрушения либо самообрушения вмещающих пород; закладки выработанного пространства пустыми породами от проходки выработок, рудосортировки; замагазинированной руды в качестве временной закладки, область применения которых устанавливается с учетом особенностей проявления природных и техногенных напряжений, деформационных и прочностных свойств;

- комплексной оценкой напряженно-деформированного состояния естественных и техногенно измененных массивов инструментальными, геофизическими и численными методами;

7) применение в удароопасных и неустойчивых вмещающих породах рациональных схем подготовки, нарезки и отбойки руды, обеспечивающих уменьшение изрезанности отрабатываемого участка массива подготовительными и нарезными выработками и сейсмического воздействия на него взрыва;

8) применение при отработке бедных или забалансовых руд комбинированной технологии, включающей физико-техническую и физико-химическую с предварительной рудосортировкой (в шахте или на поверхности) рентгено-радиометрическими, радиометрическими и другими методами, в т.ч. на грохотах по классам крупности и содержанию с выделением пустой породы, обогащенной руды для дальнейшего передела (обогатительная фабрика, гидрометаллургический завод) и рядовой, предназначенной для выщелачивания (кучное или подземное в камерах).

Перечисленные принципы построения новой геотехнологии позволяют разработать высокоэффективные геотехнологические схемы отработки сложноструктурных залежей, адаптируемые к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям сложноструктурных месторождений.

Главными особенностями новой геотехнологии являются:

- высокая производительность труда, которая достигается применением серийно выпускаемого высокопроизводительного бурового и погрузочно-доставочного оборудования, отбойки руды параллельно сближенными скважинами с рациональными параметрами БВР, определяемыми по разработанной методике, самотечной, механической и силой взрыва доставке руды;

- невысокое разубоживание и потери руды за счет использования щелевой отбойки параллельно сближенными шпуровыми или скважинными зарядами, зачистки обогащенной рудной мелочи с почвы и бортов выработанного пространства высоконапорным гидросмывом, высокой степени доразведки запасов как в процессе подготовки и нарезки, так и очистной выемки, а также предварительного обогащения руды в шахте или на поверхности различными способами;

- повышение безопасности труда в связи с исключением нахождения людей в очистном пространстве и снижение потерь руды при добыче вследствие применения геомеханически обоснованных рациональных параметров конструктивных элементов систем разработки, установленных с учетом горно-геологических, горнотехнических условий и естественного напряженного состояния;

- простота и высокая степень унификации и адаптации технологических схем подготовки и очистной выемки к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям;

- полнота отработки рудных залежей за счет выемки и переработки бедных и забалансовых руд комбинированными способами (физико-технической и физико-химической геотехнологиями).

На основе этих принципов разработаны для различных горно-геологических и горнотехнических условий разработки сложноструктурных месторождений 12 унифицированных технологических схем подготовки и очистной выемки физико-технической геотехнологией, 6 - физико-химической, 1– комплексной технологии добычи и переработки беднобалансовых урановых руд с рудоподготовкой на поверхности, 2 - комбинированной технологии с рудоподготовкой в подземных условиях, представленных в диссертационной работе. Ввиду ограниченного объема автореферата нами приведена часть технологических схем.

Усовершенствованная система разработки с магазинированием руды (патент РФ №2386031) (рисунок 14) предназначена для отработки тонких и маломощных крутопадающих жил в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях (большая глубина разработки, высокое горное давление, среднеустойчивые или удароопасные вмещающие породы и руда, сложная морфология жил).

Отбойку руды в блоке производят как шпурами в обычном исполнении, так и параллельно сближенными зарядами с её магазинированием в выработанном пространстве. Возможно применение скважин малого диаметра с последующей двойной сортировкой руды.

Отработку ведут с временным оставлением внутри магазина вертикального столба отбитой руды, не производя из него через люки частичный выпуск. Рудный столб выполняет функцию временной закладки для поддержания боков очистной камеры в устойчивом состоянии за счет уменьшения обнажения площади выработанного пространства. Это

предотвращает развитие деформационных процессов в массиве и снижает отслоение вмещающих пород.

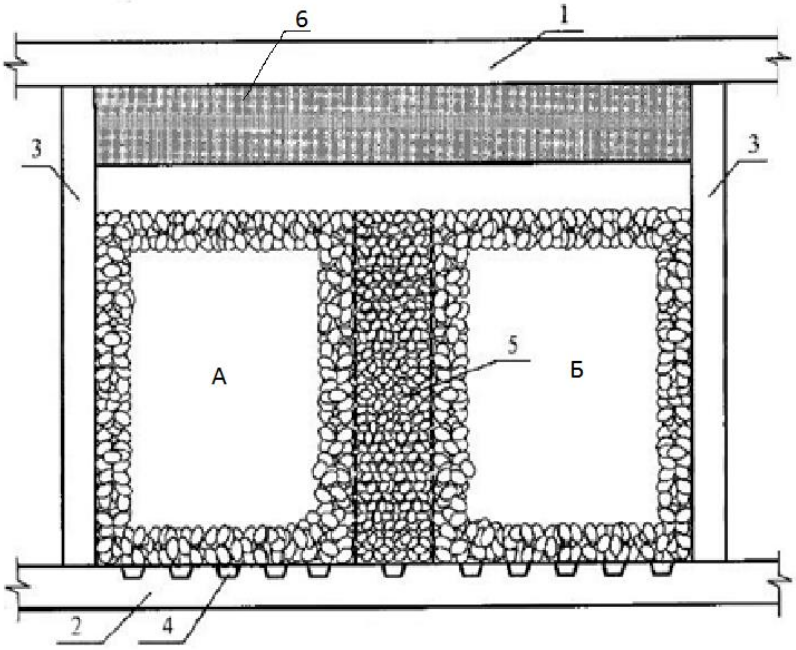


Рисунок 14 - Общий вид усовершенствованной системы разработки с магазинированием руды: 1 - вентиляционный штрек; 2 - откаточный штрек; 3 - блоковые восстающие; 4 - выпускные люки; 5 - временно оставляемый внутри магазина вертикальный столб из отбитой руды; 6 - искусственный или рудный целик

После отбойки руды в блоке и полного выпуска замагазинированной руды из смежных с рудным столбом частей блока А и Б производят её обрушение одним из изложенных выше способов (стр.24) и последующий выпуск через люки или другие выпускные устройства.

Система разработки с магазинированием и отбойкой руды глубокими скважинами из подэтажных штреков (рисунок 15) предназначена для выемки с относительно выдержанными элементами залегания маломощных крутопадающих рудных тел в сложных горно-геологических и горно-технических условиях (большая глубина разработки, высокое горное давление, среднеустойчивые или удароопасные вмещающие породы и руда).

Отбойка производится параллельно сближенными скважинами малого диаметра, которые бурят из подэтажных буровых штреков. По последним самоходными ПДМ осуществляется доставка руды от частичного выпуска в количестве 20…30%. Это обеспечивает образование компенсационного пространства, на которое взрываются последующие 2…3 ряда.

После отбойки запасов верхнего подэтажа производят в нисходящем порядке добычные работы на последующих (последовательная выемка). Отработка подэтажей может осуществляться с опережением верхних над нижними.

После отбойки всех запасов в блоке производят полный выпуск в последовательности, приведенной на рисунке 15. Зависшая в столбе руда ликвидируется способами, приведенными на стр.24, кроме подачи воды по перфорированному трубопроводу и водовоздушной смеси с помощью ГПЛЗ-2. Насыщение водой замагазинированной руды, с целью увеличения её текучести, производится через погрузочные заезды вентиляционного горизонта.

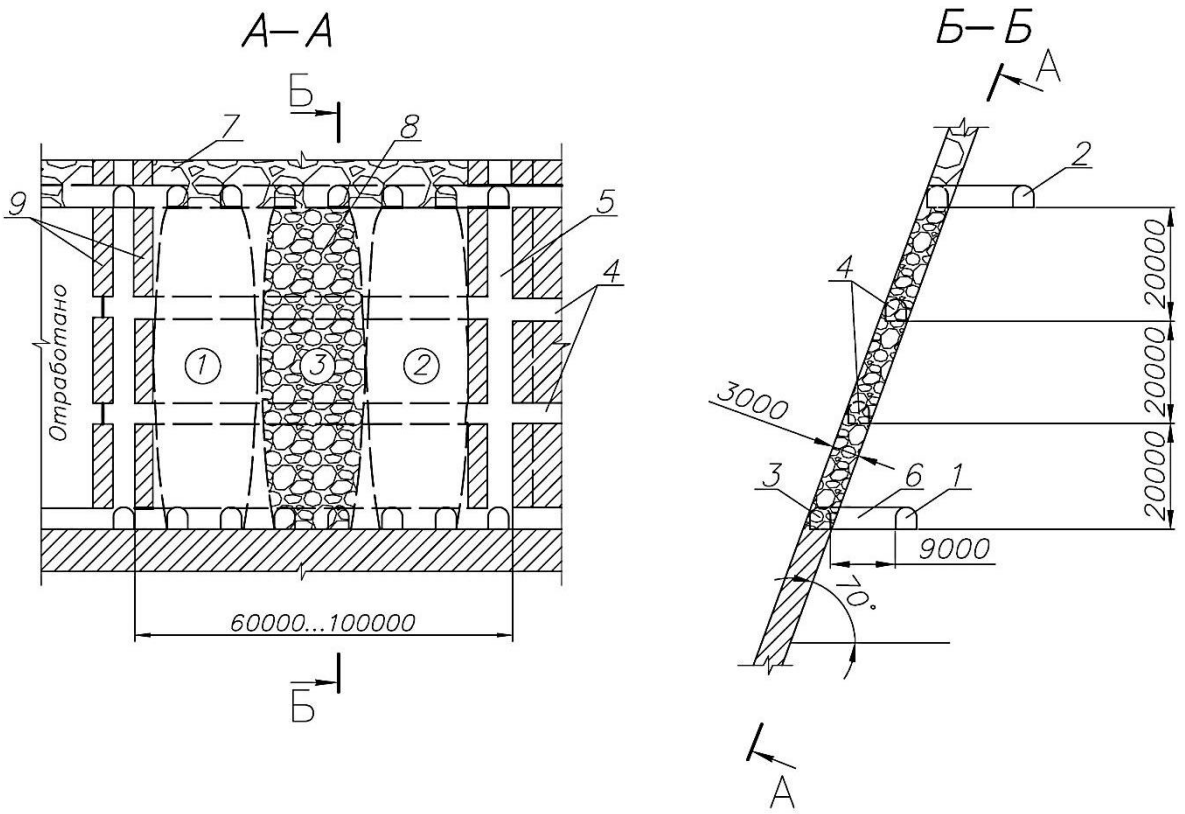


Рисунок 15 - Система разработки с магазинированием и отбойкой руды глубокими скважинами из подэтажных штреков: 1 – полевой откаточный штрек; 2 – полевой вентиляционный штрек; 3 – буровой штрек; 4 – подэтажный буровой штрек; 5 – блоковый восстающий; 6 – погрузочный заезд; 7 – обрушенная порода; 8 – замагазинированная руда; 9 – междублоковый целик

Очистное пространство на период отработки блока поддерживается междублоковыми целиками и временно замагазинированной рудой. После полной отработки запасов блока производится погашение выработанного пространства твердеющей или сухой породной закладкой через погрузочные заезды вентиляционного горизонта, самообрушением либо принудительным обрушением вмещающих пород взрывными скважинами, пробуренными из этих же заездов.

Отработка целиков осуществляется известными методами после или до погашения выработанного пространства в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий.

Снижение разубоживания на 10…20% при проходке выработок и отбойке руды производится её подземной рудосортировкой по классам крупности и содержанию металла на полевом откаточном штреке (горизонте выпуска) в рудоспуски, оборудованные грохотами.

В предлагаемом варианте системы разработки отбойку руды можно производить также вертикальными прирезками с применением комплекса КОВ-25. В этом случае необходимым условием является наличие устойчивых вмещающих пород висячего бока.

Для отработки *маломощных пологих и наклонных рудных залежей*, как наиболее сложных в эксплуатации месторождений, представлены следующие *технологические схемы*.

Вариант 1 (рисунок 16) предназначен для выемки жил с изменчивым углом падения по простиранию, *вариант 2* (рисунок 17) – по падению-восстанию. Разновидностью варианта 1 является *вариант 3* (патент РФ №2402681) (рисунок 18).

Экономическая оценка предлагаемых технологий и определение наиболее эффективной произведена по удельным приведенным затратам $З_{прив.}$ и прибыли (ПР) с 1 т погашенных балансовых запасов по методике академика М.И. Агошкова:

$$З_{прив.}=С_{т.}+Е\cdot К_{у.}, \text{ руб/т}, \quad (23)$$

где $С_{т.}$ – полная себестоимость добычи и переработки 1 т товарной руды, руб/т; Е – коэффициент эффективности капиталовложений, Е=0,105; $К_{у.}$ – удельные капиталовложения, руб/т;

$$ПР=Ц_{б.}\cdot К_{н.}\cdot К_{и.о.} – (С_{б.}\cdot К_{н.}+Е\cdot К_{у.}), \text{ руб/т}, \quad (24)$$

где $Ц_{б.}$ - валовая ценность 1 т балансовых запасов, руб/т; $К_{н.}$ - коэффициент извлечения из недр, дол.ед.; $К_{и.о.}$ - коэффициент извлечения полезного компонента при переработке (обогащении), дол.ед.; $С_{б.}$ - полная себестоимость добычи и переработки 1 т балансовых запасов, руб/т.

Предложенные технологические схемы рассчитаны для различных мощностей жилы, типов погрузочно-доставочного оборудования и крепи. Расчеты приведены в диссертации.

В результате установлено, что все предложенные варианты по приведенным затратам эффективнее (на 2…30%) применяемой на Бом-Горхонском руднике камерно-столбовой системы при мощности жилы m=1,0 м. Кроме того, они производительнее (в 1,7…2,5 раза) и обеспечивают более высокие показатели извлечения полезного ископаемого из недр (снижение потерь руды в 1,7…2,1 раза, разубоживания - в 1,2…1,75 раза).

Рудосортировка грохочением позволяет уменьшить объем пустой породы в руде, подаваемой на фабрику в 1,7…2,2 раза, тем самым увеличить в 1,25...1,34 раза содержание металла в товарной руде и снизить объем перерабатываемой на фабрике рудной массы. Зависимости изменения потерь, разубоживания, производительности труда забойного рабочего, полной себестоимости добычи и переработки 1 т товарной руды и удельных приведенных затрат от мощности рудного тела представлены в таблице 6. Графики приведены в диссертации.

Максимальный ожидаемый годовой экономический эффект имеет место при системе разработки в варианте 3 и составляет 24,5 млн. рублей за счет увеличения производительности труда в 1,7 раза (с 2,5 до 4,2 $м^3$/чел.см.) и уменьшения потерь и разубоживания руды соответственно в 2,0 (с 20 до 10%) и 1,7 (с 38 до 22%) раза.

Область эффективного применения предлагаемых технологий определяли по прибыли с 1 т погашенных балансовых запасов при различной мощности рудного тела (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м) и содержании металла в балансовой руде (0,55%; 0,65%; 0,75%; 0,85%) для вариантов с рудосортировкой грохочением и без рудосортировки.

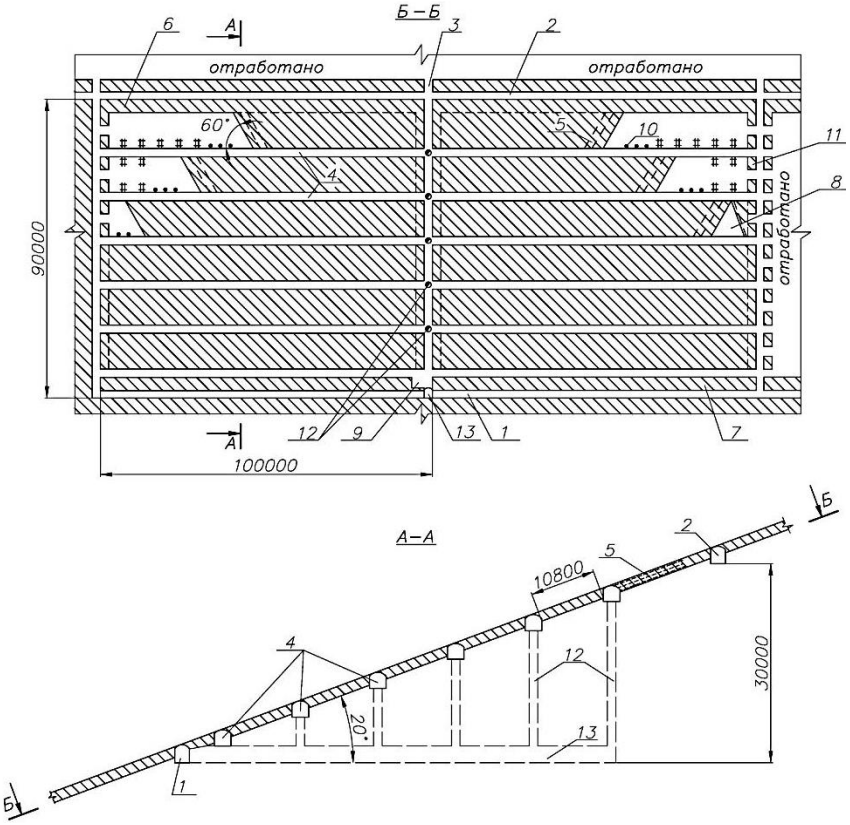


Рисунок 16 - Система разработки пологих и наклонных маломощных жил со сплошной подэтажной выемкой по простиранию, скважинной (или шпуровой) отбойкой и комбинированной доставкой руды: 1 – откаточный штрек; 2 – вентиляционный штрек; 3 – блоковый восстающий; 4 – подэтажные штреки; 5 – скважины; 6 – подштековый целик; 7 – надштековый целик; 8 – отрезная щель; 9 – ниша под скреперную лебедку; 10 – взрывозащищённые гидростойки; 11 – междублоковый целик; 12 – аккумулирующий рудоспуск; 13 – погрузочный заезд.

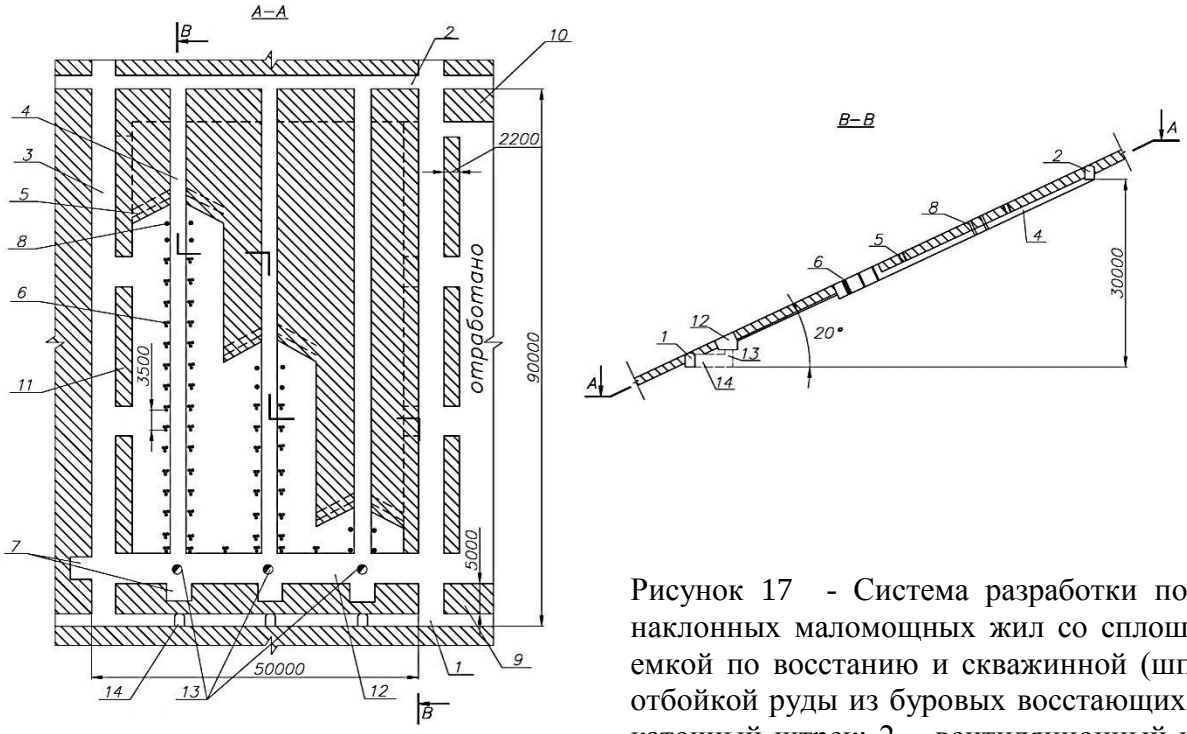


Рисунок 17 - Система разработки пологих и наклонных маломощных жил со сплошной выемкой по восстанию и скважинной (шпуровой) отбойкой руды из буровых восстающих: 1 – откаточный штрек; 2 – вентиляционный штрек; 3 – блоковый восстающий; 4 – буровой восстающий; 5 – скважина; 6 – кустовая крепь; 7 – ниша под скреперную лебедку; 8 – взрывозащищенная гидростойка; 9 – надштековый целик; 10 – подштековый целик; 11 – междублоковый целик; 12 – отрезная выработка; 13 – аккумулирующие рудоспуски; 14 – погрузочный заезд.

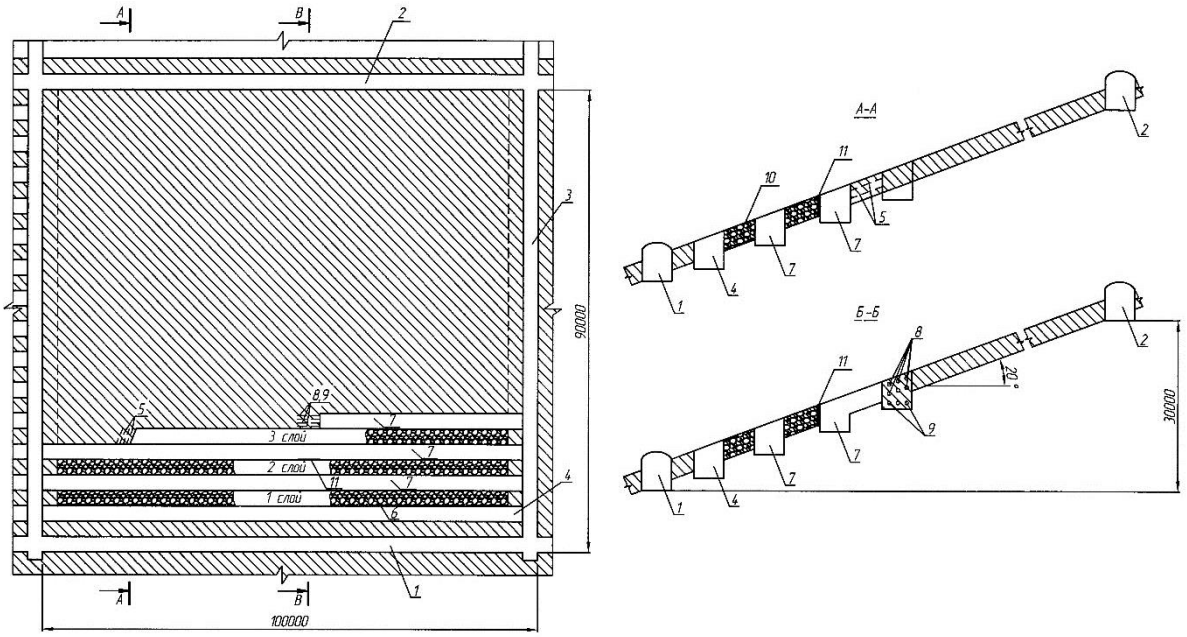


Рисунок 18 - Система разработки пологих и наклонных рудных тел со сплошной выемкой, раздельной отбойкой руды горизонтальными слоями по восстанию и закладкой выработанного пространства вмещающими породами: 1 - откаточный штрек; 2 - вентиляционный штрек; 3 - блоковый восстающий; 4 - отрезной штрек; 5 - наклонные шпуры (скважины); 6 - выработанное пространство; 7 - подсечная выработка; 8 - шпуры (скважины) по руде; 9 - шпуры (скважины) по породе; 10 - закладка; 11 - отбойный щит

Таблица 6 - Зависимости изменения основных технико-экономических показателей от мощности рудного тела

Наименование зависимости	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Изменение потерь от мощности	П = 3,14m + 6,4 (R^2 = 0,99)	П = 4,24m + 7,7 (R^2 = 0,99)	П = 3,18m + 6,55 (R^2 = 0,994)
Изменение разубоживания от мощности без рудосортировки	Р = -30,7ln(m) + 31,69 (R^2 = 0,99)	Р = -33,9ln(m) + 31,34 (R^2 = 0,99)	Р = -22,4ln(m) + 22,92 (R^2 = 0,99)
Изменение разубоживания от мощности с рудосортировкой грохочением	Рг = -24ln(m) + 23,64 (R^2 = 0,99)	Рг = -25,9ln(m) + 23,1 (R^2 = 0,99)	Рг = -17,5ln(m) + 18,4 (R^2 = 0,98)
Производительность труда забойного рабочего от мощности	А = 3,313ln(m) + 6,1 (R^2 = 0,99)	А = 2,901ln(m) + 5,7 (R^2 = 0,99)	А = 3,258ln(m) + 4,4 (R^2 = 0,98)
Полная себестоимость добычи и переработки 1 т товарной руды от мощности	Ст = -296ln(m) + 1007 (R^2 = 0,99)	Ст = -365ln(m) + 1177 (R^2 = 0,99)	Ст = -197ln(m) + 845,9(R^2 = 0,99)
Удельные приведенные затраты от мощности	Зпр = -296ln(m) + 1013 (R^2 = 0,99)	Зпр = -365ln(m) + 1181 (R^2 = 0,99)	Зпр = -197ln(m) + 851,5 (R^2 = 0,99)

Установлено, что для предложенных систем разработки зависимость изменения прибыли с 1 т погашенных балансовых запасов (ПР) от мощности рудного тела (m) аппроксимируется кубическим уравнением вида

$$ПР=Am^3 – Bm^2 + Cm – D, \text{ руб/т} \quad (25)$$

с величиной достоверности аппроксимации R=0,98.

Область эффективного применения предлагаемых систем разработки определена из условия обеспечения положительной прибыли (ПР≥ 0) в зависимости от содержания металла в балансовой руде (с, %) и мощности (*m*, м) рудного тела (рисунки 19, 20).

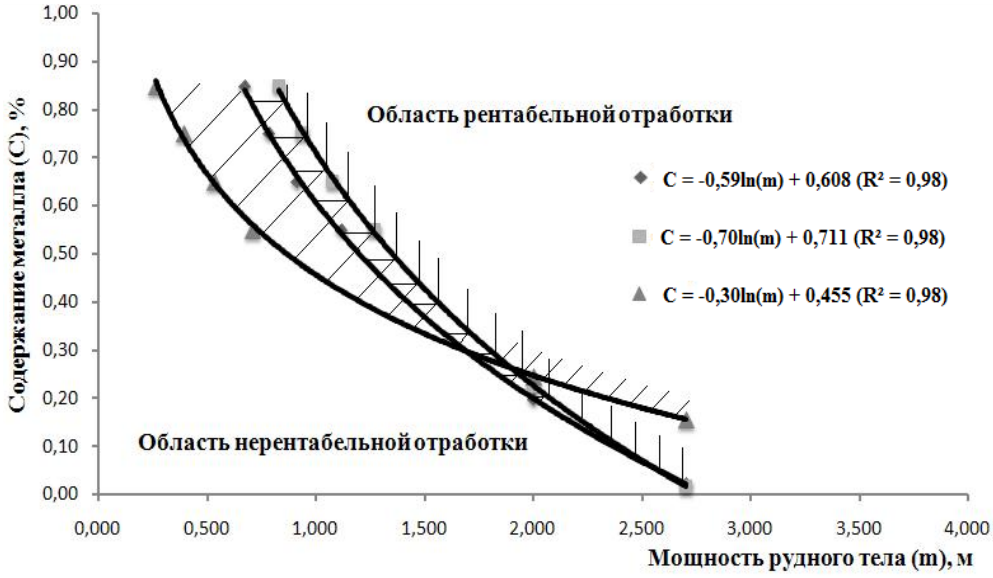


Рисунок 19 - Область применения предлагаемых технологий без рудосортировки
(◆ – Вариант 1; ■ – Вариант 2; ▲– Вариант 3)

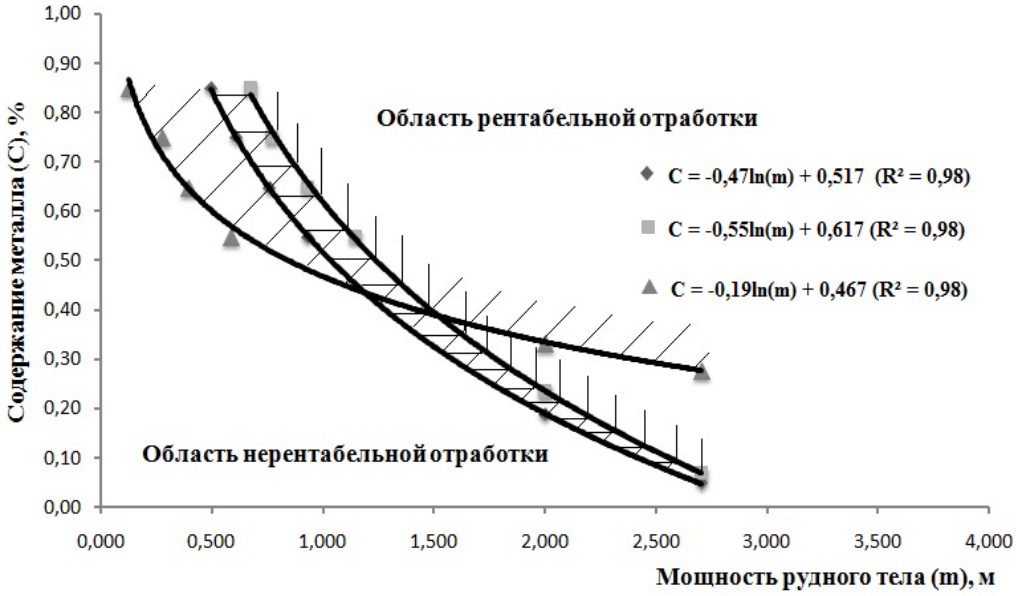


Рисунок 20 - Область применения предлагаемых технологий с рудосортировкой грохочением
(◆ – Вариант 1; ■ – Вариант 2; ▲– Вариант 3)

Зависимость изменения содержания металла (с, %) от мощности рудного тела (m, %) аппроксимируется логарифмическим уравнением

$$c=-A\ln(m)+D,\ \% \qquad (26)$$

с величиной достоверности аппроксимации R=0,98.

Из графика (рисунок 19) видно, что применение системы разработки пологих и наклонных рудных тел со сплошной выемкой, раздельной отбойкой руды горизонтальными слоями по восстанию и закладкой выработанного пространства вмещающими породами (вариант 3) без рудосортировки эффективно при мощности рудного тела до 1,7 м и содержании металла более 0,3%. При бóльших значениях мощности экономически выгодны варианты 1 и 2 – системы разработки с подэтажной выемкой по простиранию, скважинной (или шпуровой) отбойкой и комбинированной доставкой руды и со сплошной выемкой по восстанию и скважинной (шпуровой) отбойкой руды из буровых восстающих. Из них предпочтительнее первый до значения мощности рудного тела 2 м и содержания металла более 0,2%. При мощности более 2 м варианты 1 и 2 практически равноценны.

При рудосортировке грохочением область применения всех трех вариантов систем разработки расширяется (рисунок 20). Так, в варианте 3 рентабельная отработка имеет место при мощности рудного тела до 1,2 м и содержании металла более 0,4%. При бóльших значениях мощности эффективнее применять вариант 1. Сравнение первого и второго вариантов показывает, что они становятся практически равнозначными при отработке рудных тел мощностью 2,5…3 м.

Комбинированная технология с рудоподготовкой в подземных горных выработках (рисунок 21) предназначена для отработки бедных руд сложноструктурных месторождений (патент РФ №2659107).

Отличительной особенностью данной технологии является предварительная сортировка руды в подземных условиях и использование её промежуточных и хвостовых продуктов в процессе подземной добычи руды. Пустая порода размещается в отработанных камерах, как и бедная руда, которая выщелачивается, а обогащенная руда выдается на поверхность и перерабатывается на гидрометаллургическом заводе. При этом добыча руды производится системами разработки с открытым очистным пространством (подэтажные штреки и др.).

Технологическое оборудование для предварительного обогащения добытой рудной массы размещается в подземном рудосортировочном комплексе (рисунок 22), который включает: накопительный рудоспуск, аккумулирующий добытую рудную массу; подземный бункерный комплекс, включающий камеры дробления, грохочения и сортировки руды; системы горного транспорта руды.

Рудосортировочный комплекс размещается в непосредственной близости от главных вскрывающих выработок за пределами зон разрушающих сейсмических воздействий от взрывных работ и возможного сдвижения горных пород при добыче руды. Такое размещение обеспечит безопасность работ и сохранность подземных камер, эффективное проветривание камер, наименьшие затраты на транспорт и подъем рудного концентрата. Транспортные системы рудосортировочного комплекса, связывающие между собой потоки руды, базируются как на уже существующем внутришахтном оборудовании, так и на использовании новых высокопроизводи-

тельных комплексов конвейерного, самоходного и локомотивного транспорта.

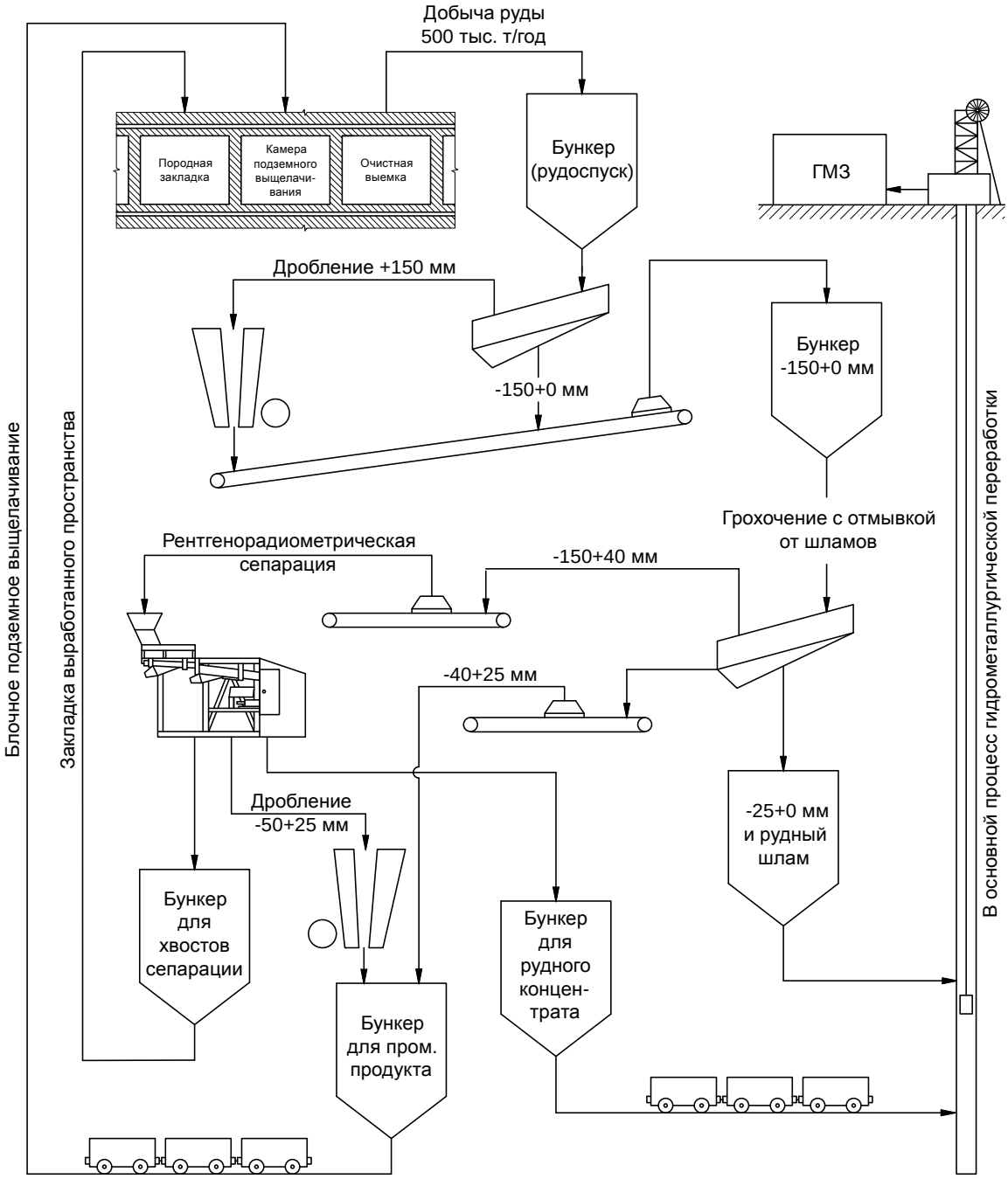


Рисунок 21 - Комбинированная технология с рудоподготовкой в подземных горных выработках

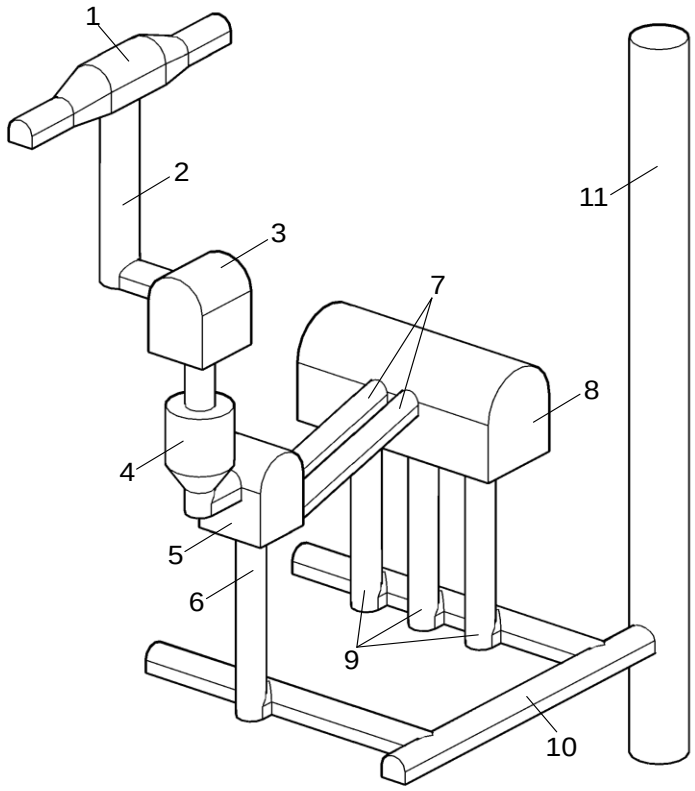


Рисунок 22 - Структурная схема подземного рудосортировочного комплекса: 1 – разгрузочный пункт с опрокидывателем; 2 – накопительный рудоспуск; 3 – камера дробления руды; 4 – аккумулирующий бункер; 5 – камера грохочения руды; 6 – рудоспуск для обогащенной руды; 7– транспортные наклонные выработки; 8 – камера сортировки руды с рентгенорадиометрическими сепараторами; 9 – рудоспуски для концентрата, промпродукта и хвостов сепарации; 10 – выработки откаточного горизонта; 11 – рудовыдачной ствол

Выпущенная из очистных камер руда транспортируется в накопительный рудоспуск и подвергается предварительному грохочению. Выделенные куски крупностью +150 мм дополнительно измельчаются в щековой дробилке и затем объединяются с подрешетным продуктом в общем аккумулирующем бункере.

На второй стадии грохочения руда отмывается от шламовых и илистых частиц, разделяется на три потока: надрешетный продукт (машинный класс крупности -150+40 мм); подрешетный продукт (несортируемый класс крупности -40+25 мм – не подвергается рентгенорадиометрической сепарации (РРС) из-за низкой производительности и эффективности процесса); подрешетный продукт (обогащенная рудная мелочь крупности -25+0 мм и шлам).

Обогащенная часть руды размещается в рудоспуске, откуда в последующем выдается на поверхность и перерабатывается гидрометаллургической технологией. Классы крупности -150+40 мм и -40+25 мм по наклонным конвейерным выработкам направляются в технологическую камеру сортировки.

Машинный класс сортируется на рентгенорадиометрических сепараторах российского производства типа СРФ с разделением руды на три технологических типа: концентрат, промпродукт, хвосты. Каждый продукт, полученный в результате сортировки руды, размещается в отдельный накопительный бункер (рудоспуск). Объемы рудоспусков должны иметь возможность загрузки продуктов, обеспечивающих необходимую суточную производительность комплекса.

Рудный концентрат по шахтному стволу выдается на поверхность и перерабатывается на гидрометаллургическом заводе, промпродукт после дополнительного дробления объединяется с несортируемым классом

крупности -40+25 мм в одном рудоспуске и направляется в ранее подготовленную камеру для подземного выщелачивания. Хвосты сепарации (пустая порода) размещают в отработанные очистные камеры в качестве сухого закладочного материала. Таким образом, каждый отсортированный продукт направляется на дальнейшую переработку по технологии, позволяющей извлечь уран из руды с получением максимума готовой продукции в виде концентрата минерального сырья.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения в производство комбинированной технологии с рудоподготовкой в подземных горных выработках при разработке уранового месторождения составит 200…250 млн. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований, опытно-промышленных испытаний изложены новые научно обоснованные технологические решения по развитию геотехнологии подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие горнодобывающего комплекса страны.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Определена и исследована совокупность геологических и горнотехнических факторов, определяющих сложность структуры месторождения, как объекта разработки, и предложен новый методологический подход к оценке локальных и интегральных показателей на основе сопоставления диапазона и шага изменчивости каждого фактора.

2. Разработан комплекс новых формализованных индикаторов измерения сложности структуры рудных месторождений, как горнотехнических объектов, позволяющий дать их интегральную и дифференцированную оценку в процессе выбора геотехнологических решений.

3. Установлены зависимости изменения первоначальных природных напряжений горного массива от глубины разработки и характер распределения напряжений в междуэтажных и междукамерных целиках, кровле очистных камер при разработке сложноструктурных месторождений и на их основе усовершенствована методика расчета устойчивых размеров целиков и обнажений кровли камер.

4. Определены показатели деформационных и прочностных свойств массива раздробленных пород в зависимости от средневзвешенного размера куска и величины нагрузки и установлено их влияние на напряженно-деформированное состояние бортов карьера и подземной камеры в зависимости от степени заполнения геоматериалом.

5. Установлены характер движения рудной массы в узком очистном пространстве, особенности её деформирования и определены зависимости площади зависаний и эллипсоидов выпуска и относительной продольной деформации раздробленной руды от её плотности (коэффициента разрыхления), влажности, угла падения, мощности залежи и ширины рудного столба.

6. Выявлен характер распределения полезного компонента по классам крупности при увеличении масштаба отбойки в условиях ограниченной выемочной мощности и установлено, что эффект обогащения рудной мелочи в процессе отбойки определяется не только размером зоны бризантного действия зарядов, но и формой нахождения полезного компонента в руде.

7. На основании ранее проведенных и собственных исследований выдвинута и разработана гипотеза механизма взрыва параллельно сближенными зарядами, в которой разрушение массива происходит от волн деформаций при взрыве ВВ и упругой реакции массива при взаимодействии их по линии зарядов, и установлено, что характер распределения общей энергии взрыва в отбиваемом массиве соответствует требованиям технологически обусловленной асимметрии этого распределения.

8. Обоснованы принципы построения новой геотехнологии и разработаны унифицированные и адаптируемые к изменяющимся горно-геологическим и горнотехническим условиям технологические схемы подготовки и отработки рудных тел, установлены зависимости изменения основных технико-экономических показателей и определена область рентабельного применения технологических схем разработки маломощных пологих и наклонных сложноструктурных месторождений.

9. Разработанные технологии (сплошная система разработки с однослойной выемкой расширенными заходками, система разработки подэтажные штреки, отработка междукамерных целиков буровзрывным способом с применением параллельно сближенных зарядов, зачистка обогащенной рудной мелочи с почвы выработанного пространства гидромеханическим способом) внедрены в ПАО «ППГХО» и на Бом-Горхонском руднике с экономическим эффектом 328,1 млн. руб за счет улучшения качества добываемой руды и снижения ее себестоимости.

10. Разработанные рекомендации по технологическим процессам управления горным давлением и буровзрывной подготовке приняты к использованию на рудниках ПАО «ППГХО», а также применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО ЗабГУ при подготовке горных инженеров по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Подземная разработка рудных месторождений».

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

- в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации

1. Лизункин М.В. Количественная оценка сложности структуры рудных месторождений при решении горно-технологических задач / **М.В. Лизункин**, В.М. Лизункин // Рациональное освоение недр. — 2020. — № 3. — С. 40 – 45.

2. Галченко Ю.П. Методика определения области применения шпуровой и скважинной отбойки рудных тел сложноструктурных месторождений / Ю.П. Галченко, В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Е.Д. Якушева // Инженерная физика. — 2020. — № 2. — С. 51 – 58.

3. Лизункин В.М. Результаты опытно-промышленных испытаний технологии отработки маломощных пологопадающих пластообразных рудных залежей расширенными заходками / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, А.Н. Рабольт, С.Г. Гуров // Горный журнал. - 2019. – №1. – С. 37-40.

4. Морозов А.А. Комплексная технология добычи и переработки беднобалансовых урановых руд /А.А. Морозов, В.М. Лизункин, П.Б. Авдеев, **М.В. Лизункин** // Горный журнал. - 2018. – №7. – С.44-48.

5. Лизункин В.М. Оценка прочностных свойств ураносодержащих руд Стрельцовского рудного поля / В.М. Лизункин, В.А. Бабелло, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // Горный журнал. - 2018. – №4. – С. 51-55.

6. Лизункин В.М. Определение коэффициента Пуассона раздробленных скальных пород различного гранулометрического состава / В.М. Лизункин, В.А. Бабелло, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // Горный журнал. - 2017. – №2. – С. 45-50.

7. Лизункин В.М. Оценка деформируемости раздробленных скальных пород Стрельцовского рудного поля / В.М. Лизункин, В.А. Бабелло, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. - №2. - С. 84-93.

8. Лизункин В.М. Исследование устойчивости бортов карьера при комбинированном способе доработки месторождения «Т» / В.М. Лизункин, А.В. Волохов, **М.В. Лизункин** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2016. – № 12. – С.153-165.

9. **Лизункин М.В**. Технологические схемы подготовки руды для блочного подземного выщелачивания при отработке месторождений Стрельцовского рудного поля / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2016. – № 3. – С. 297-305.

10. **Лизункин М.В.** Исследование природных напряжений на месторождениях Стрельцовского рудного поля / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2016. – № 3. – С. 290-296.

11. Тюпин В.Н. Определение размера зоны разрушения напряженного трещиноватого горного массива при одновременном взрывании нескольких параллельно сближенных зарядов ВВ / В.Н. Тюпин, **М.В. Лизункин**, В.М. Лизункин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2015. – № 12. – С.46-51.

12. Лизункин М.В. Установление радиуса зоны дробления трещиноватого напряженного горного массива при взрыве двух параллельно сближенных зарядов ВВ / **М.В. Лизункин**, В.Н. Тюпин, В.М. Лизункин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2015. – № 12. – С.16-22.

13. **Лизункин М.В.** Опыт скважинной отбойки маломощных урановых руд / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2015. – № 10. – С. 23-26.

14. Лизункин В.М. Оценка устойчивости бортов карьера и подземной камеры методом конечных элементов при комплексной технологии отработки беднобалансовых урановых руд / В.М. Лизункин, С.В. Шурыгин, **М.В. Лизункин,** А.В. Бейдин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2015. – № 4. – С. 59-66.

15. Лизункин В.М. Результаты испытаний отбойки руды параллельно-сближенными зарядами при отработке урановых руд Стрельцовского месторождения / В.М. Лизункин, С.В. Шурыгин, **М.В. Лизункин** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2015. – № 4. – С. 41-50.

16. Шурыгин С.В. Комплексная технология отработки беднобалансовых урановых руд геотехнологическими методами / С.В. Шурыгин, А.А. Морозов, В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // Подземные геотехнологии разработки рудных месторождений: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2014. – № 12. – С. 15-28.

17. Лизункин В.М. О технической возможности применения системы разработки с магазинированием руды в сложных горно-геологических условиях / В.М. Лизункин, А.А. Погудин, **М.В. Лизункин** // Подземные геотехнологии разработки рудных месторождений: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2014. – № 12. – С. 3-15.

18. Лизункин В.М. Определение первоначальных (природных) напряжений горных массивов на месторождениях Стрельцовское и Антей / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Е.Л. Сосновская, А.В. Бейдин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2014. – № 4. – С. 207-215.

19. Лизункин В.М. Особенности напряженно-деформированного состояния горного массива на Юбилейном месторождении / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Е.Л. Сосновская, А.В. Бейдин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2014. – № 4. – С. 201-206.

20. Галченко Ю.П. Исследование возможностей решения экологических задач за счет управления распределением энергии взрыва / Ю.П. Галченко, **М.В. Лизункин**, А.С. Шуклин // Экол. системы и приборы. - 2012. - № 12. - С. 57 - 62.

21. Галченко Ю.П. Экологические особенности применения раздельной выемки при подземной разработке пологих жил / Ю.П. Галченко, **М.В. Лизункин**, А.С. Шуклин // Экол. системы и приборы. - 2012. - № 11. - С. 57 - 63.

22. Лизункин В.М. Особенности условий и обоснование направлений совершенствования технологии разработки маломощных пологих и наклонных жил Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, Р.В. Ситников, **М.В. Лизункин**, Е.Н. Чо-дин-чо // Забайкалье: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). – М.: ГОРНАЯ КНИГА, 2009. – № ОВ3. – С. 154-161.

23. **Лизункин М.В**. Определение первоначальных (природных) напряжений горного массива Бом-Горхонского вольфрамового месторождения // Вестник Читинского государственного университета (Вестник ЧитГУ). – Чита: ЧитГУ, 2009. – № 2 (53). – С. 35-38.

- прочие издания:

24. Галченко Ю.П. Методика определения сложности структуры рудных месторождений как экологического объекта / Ю.П. Галченко, В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Е.Д. Якушева // Экологические системы и приборы. - 2020. - № 1. - С. 46 - 55.

25. Лизункин В.М. Исследование механических свойств раздробленных скальных пород / В.М. Лизункин, В.А. Бабелло, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин, К.Ю. Шишмарева // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XVII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст. [в 3 ч.] / Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2017. – Ч1. – С. 209-214.

26. Лизункин В.М. Конструкция стенда для определения модуля деформации раздробленных скальных пород / В.М. Лизункин, В.А. Бабелло, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин, К.Ю. Шишмарева // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XVII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. ст. [в 3 ч.] / Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2017. – Ч1. – С. 141-147.

27. Лизункин В.М. Геомеханическое обоснование конструктивных параметров комплексной технологии отработки беднобалансовых урановых руд / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ» (15-17.05.2017): сб. науч. тр. – Санкт-Петербург: Изд-во СПГУ, 2017. – С.56-63.

28. Лизункин М.В. Оценка напряженно-деформированного состояния бортов карьера и подземной камеры методом конечных элементов при отработке подкарьерных запасовТулукуевского месторождения / **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин, Е.Л. Сосновская, М.Э. Степанов, А.Е. Старков // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. / под ред. проф. Б.Л. Тальгамера. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ,2016. – Вып. 16. – С. 26-33.

29. **Лизункин М.В.** Определение первоначальных (природных) напряжений на Тулукуевском месторождении / «Проблемы недропользования» в аспекте международного сотрудничества Байкальского региона и Монголии: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. / Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2016. – С. 32-38.

30. Лизункин В.М. Технологические схемы блочного подземного выщелачивания при отработке пологих и наклонных залежей Стрельцовского рудного поля / В.М. Лизункин, Г.Г. Пирогов, **М.В. Лизункин**, В.Е. Подопригора, С.В. Шурыгин // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XV Международная научно-практическая конференция: сб. ст. [в 3 ч.] / Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2015. – С. 17-23.

31. Лизункин В.М. Технологические схемы блочного подземного выщелачивания при отработке крутопадающих залежей Стрельцовского рудного поля / В.М. Лизункин, Г.Г. Пирогов, **М.В. Лизункин**, В.Е. Подопригора, С.В. Шурыгин // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XV Международная научно-практическая конференция: сб. ст. [в 3 ч.] / Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2015. – С. 11-17.

32. Лизункин М.В. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород Стрельцовского рудного поля / **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4-5 июня 2014 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014.– С. 30-38.

33. Лизункин М.В. Исследования напряженно-деформированного состояния горного массива Стрельцовского рудного поля / **М.В. Лизункин**, А.В. Бейдин, С.В. Шурыгин // Кулагинские чтения: техника и технология производственных процессов: XIV Международная научно-практическая конференция: сб. ст. [в 3 ч.] / Забайкал. гос. ун-т. – Чита, 2014. – Ч. I. – С. 36-40.

34. Лизункин В.М. Результаты опытно-промышленных испытаний отбойки руды деконцентрированными зарядами ВВ на Бом-Горхонском вольфрамовом месторождении / В.М. Лизункин, Ю.П. Галченко, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников // Кулагинские чтения: X Всероссийская научно-практическая конференция. – Чита: ЧитГУ, 2010. – Ч. I. – С. 61-64.

35. Лизункин В.М. Определение первоначальных напряжений горного массива для глубоких горизонтов Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников, Е.Н. Чо-дин-чо // Кулагинские чтения: IX Всероссийская научно-практическая конференция. – Чита: ЧитГУ, 2009. – Ч. VII. – С. 3-5.

36. **Лизункин М.В.** Оценка устойчивости целиков и обнажений кровли камер при разработке маломощных пологих и наклонных жил Бом-Горхонского вольфрамового месторождения // Комбинированная геотехнология: Комплексное освоение и сохранение недр земли: материалы международной научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 2009: Сб. трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – С. 81-83.

37. Лизункин В.М. Технико-экономическое обоснование эффективных технологических схем отработки жил простого залегания Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников // Кулагинские чтения: VIII Всероссийская научно-практическая конференция. – Чита: ЧитГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 62-66.

38. Лизункин В.М. Технически возможные технологические схемы подготовки и очистной выемки жил простого залегания Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников, Е.Н. Чо-дин-чо // Кулагинские чтения: VIII Всероссийская научно-практическая конференция. – Чита: ЧитГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 67-71.

39. Лизункин В.М. Перспективные направления совершенствования технологии разработки Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников, Е.Н. Чо-дин-чо // VII Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2007. – Ч. 1. – С. 105-108.

40. Лизункин В.М. Практика разработки маломощных пологих и наклонных жил Бом-Горхонского вольфрамового месторождения / В.М. Лизункин, Р.В. Ситников, Е.Н. Чо-дин-чо, **М.В. Лизункин** // VII Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2007. – Ч. 1. – С. 108-111.

41. Лизункин В.М. Горно-геологические и горнотехнические особенности условий эксплуатации Бом-Горхонского вольфрамового месторож-

дения / В.М. Лизункин, Е.Н. Чо-дин-чо, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников // VII Всероссийская научно-практическая конференция «Кулагинские чтения» (материалы конференции). – Чита: ЧитГУ, 2007. – Ч. 1. – С. 115-119.

- патенты на изобретения:

42. Пат. 2659107 Российская Федерация, МПК E21C41/00, B07B 9/00. Способ комбинированной разработки руд / В.М. Лизункин, А.В. Бейдин, **М.В. Лизункин**, А.А. Морозов, С.В. Шурыгин; патентообладатель Заб. гос. ун-т, - № 2017122871; заявл. 28.06.2017; опубл. 28.06.2018, Бюл. № 19. - 10 с.

43. Пат. 2634312 Российская Федерация, МПК E21C 39/00. Устройство для определения коэффициентов Пуассона и поперечных деформаций фрагментов массива раздробленных скальных пород и оценки их сжимаемости в массиве / В.А. Бабелло, А.В. Бейдин, В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**; патентообладатель Заб. гос. ун-т, - № 2016136921; заявл. 14.09.2016; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 30. - 9 с.

44. Пат. 2627349 Российская Федерация, МПК F42D 3/04. Способ получения заданной степени дробления трещиноватого напряженного горного массива при взрывании зарядов ВВ двух параллельно сближенных скважин / В.М. Лизункин, В.Н. Тюпин, **М.В. Лизункин**, Т.И. Рубашкина; патентообладатель Заб. гос. ун-т, - № 2016116701; заявл. 27.04.2016; опубл. 07.08.2017, Бюл. № 22. - 6 с.

45. Пат. 2618541 Российская Федерация, МПК E21C 41/22, F42D 3/04. Способ разработки жильных рудных тел / В.Н. Тюпин, Т.И. Рубашкина, В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**; патентообладатель Заб. гос. ун-т, - № 2016116702; заявл. 27.04.2016; опубл. 04.05.2017, Бюл. № 13. - 6 с.

46. Пат. 2420660 Российская Федерация, МПК E21F 17/00. Способ гидромеханической зачистки рудной мелочи с почвы выработанного пространства / В.М. Лизункин, Р.В. Ситников, **М.В. Лизункин**; патентообладатель Чит. гос. ун-т. - № 2009139508/03; заявл. 26.10.2009; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16. - 6 с.: 1 ил.

47. Пат. 2402681 Российская Федерация, МПК E21C 41/22. Способ разработки маломощных пологих и наклонных рудных тел / В.М. Лизункин, **М.В. Лизункин**, Р.В. Ситников; патентообладатель Чит. гос. ун-т, Ин-т прир. рес., экол. и криол. СО РАН. - № 2009128396/03; заявл. 22.07.2009; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30. - 7 с.: 3 ил.

48. Пат. 2386031 Российская Федерация, МПК E21C 41/22. Способ разработки крутопадающих рудных тел / В.М. Лизункин, А.И. Соболев, А.А. Погудин, **М.В. Лизункин**; Читинский государственный университет (ЧитГУ).- №2008138284; Заяв. 25.09.2008; Опубл. 10.04.2010 Бюл. №10.

Подписано в печать 28.01.21.
Форм. бум. 60×84/16. Бумага ксерографическая.
Способ печати оперативный. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,6.
Заказ № 21001. Тираж 150 экз.

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита. ул. Александро-Заводская, 30