

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙ-
СКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МИНЕРАЛОГИИ, ГЕОХИМИИ И КРИСТАЛЛОХИМИИ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ» (ФГБУ «ИМГРЭ»)
НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

На правах рукописи

БАРНОВ НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВИЧ

Горно-геологическая оценка, анализ типоморфных минералов и
разработка параметров геотехнологии освоения коренных место-
рождений корунда в сложных условиях высокогорья

Специальности 2.8.3 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр
и 2.8.8. – Геотехнология, горные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: д.г.-м.н. Щипцов Владимир Владимирович

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Корунд известен и популярен с глубокой древности (Corundum – Korund – Corundum), название минерала дано еще в древней Индии, на санскрите «курувинда» – рубин. Огромное значение представляют прозрачные разновидности: рубин от латинского «рубеус» – красный, сапфир от греческого «сапфейрос» – синий, падпарадша – оранжево-розовый, по цвету от сингалезского «падмарага» – цвет лотоса. На Руси рубины именовались как «красный яхонт».

Происхождение корундов остается одним из актуальных вопросов. В литературе отмечаются корунды из россыпей, но имеются лишь редкие сведения о коренных месторождениях.

К благородным разновидностям корунда многие годы сохраняется практический интерес, продиктованный особенностями рынка. Благоприятные условия для спокойного роста прозрачных кристаллов рубина и сапфира очень редки. Основная масса известных промышленных месторождений рубина и сапфира представлена аллювиальными, делювиально-аллювиальными россыпями или же остаточными древними корами химического выветривания рубино- или же сапфиринозных горных пород, образующих группу элювиальных и элювиально-делювиальных россыпей. На этом фоне в литературе обсуждаются корунды из россыпей. Отсутствуют полноценные, кроме фрагментарных, сведения о геологии, петрографии и других важных характеристиках коренных месторождений мира и, в частности, России. В связи с этими обстоятельствами появляется ряд затруднений в трактовке генезиса благородных корундов многих известных месторождений.

В последние десятилетия, в связи с быстрым освоением большого числа месторождений разных геолого-генетических типов, удельный вес жильных месторождений в добыче руд существенно сокращается. Связано это в основном с возможностью освоения крупных месторождений, представленных рудными телами большой мощности, что показано в работах Л. И. Агеевой, Ю. П. Галченко, Г. В. Клименко, Г. В. Сабянина, Е. В. Терехова, G. W. Bowersox, В. E. Chamberlin, E. J. Gübelin, R. W. Hughes и др.

Актуальной становится задача по комплексной оценке горно-геологических и горнотехнических условий месторождений благородного корунда и научному обоснованию экологически и экономически целесообразной технологии получения корундов для различных целей. Особенно важным становится вопрос, связанный с методами вскрытия и способами обеспечения доступа к благородным корундам.

Перспективная оценка обнаруженных проявлений благородного корунда базируется на геологической аналогии с промышленными месторож-

дениями драгоценных камней. На основе имеющихся к настоящему времени материалов по закономерностям размещения месторождений и проявлений корундов следует обратить внимание на основные критерии оценки условий образования корундоносных комплексов на территории России, чтобы обосновать геотехнологии освоения коренных месторождений корунда с акцентом на сложные условия высокогорья и способность к селективной дезинтеграции горных пород и благородного корунда.

Факторы, влияющие на выбор способа и системы разработки корундоносных объектов, как и других полезных ископаемых, взаимосвязаны с геологическими, горнотехническими и общеэкономическими особенностями. Настоящая ситуация сводится к тому, что усилия исследователей должны быть сконцентрированы на усовершенствовании технологий разработки коренных месторождений промышленных минералов корундовой группы – это вопрос номер один. Второй вопрос – это способы извлечения корунда.

Цель работы – оценка минералого-технологических и горно-геологических факторов, анализ типоморфных минералов и разработка параметров геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья.

Идея работы

Основная идея работы заключается в учете условий формирования свойств минералов корундовой группы на этапах их образования, роста кристаллов, метаморфизма, добычи, переработки до конечного продукта.

Для поэтапного достижения цели работы **решались следующие задачи:**

- представить типизированную генетическую классификацию корундовых месторождений мира;
- установить минералого-геохимические особенности корундов коренных месторождений на основе применения современных методов исследований;
- представить прогноз геологических и минералого-технологических параметров оценки месторождений благородных корундов различного генезиса;
- разработать новые технологии освоения коренных месторождений благородного корунда;
- предложить комплексную схему дезинтеграции горных пород, обеспечивающую сохранность ценного компонента минералов группы корунда;
- разработать новые способы извлечения благородных корундов из коренных корундоносных пород.

Методы исследований включают:

- анализ практического опыта оценки месторождений корундовой группы и обобщение данных публичной отчетности, научно-технической отечественной и иностранной литературы;

- геостатистические исследования и анализ геологоразведочных данных;
- анализ морфологии рудных образований;
- анализ продуктивности тектоно-метаморфических циклов – основных этапов формирования рассматриваемой территории как тектонической структуры и фации;
- разработку поисковых критериев как основы для оценки общих перспектив конкретных формаций корундов и прогнозирование новых типов месторождений;
- промышленный эксперимент по изучению закономерностей дробления корундосодержащих пород с использованием щадящих взрывов;
- лабораторные испытания селективного дробления с сохранением зерен корунда в режиме всестороннего сжатия;
- моделирование в аттестованных программных продуктах (Comsol Multiphysics) селективного дробления горных пород.

Научные положения, представленные к защите:

1. Разработана новая классификация месторождений корундов, в которой к существующей классификации добавлены два дополнительных класса индустриального сырья полигенных корундообразующих комплексов – коры выветривания и россыпи.

2. Обоснована комплексная горно-геологическая оценка месторождений корундов, базирующаяся на их генетической типизации и классификации, позволяющая определить целесообразность дальнейшего освоения этих месторождений.

3. Предложен метод промышленного освоения коренных месторождений корунда с использованием технологии слоевого гидровзрыва, обеспечивающий сохранение целостности кристаллов благородных корундов.

4. Разработан способ отработки месторождений, представленных крутопадающими маломощными жилами благородных корундов, уступной выемкой с отбойкой руды глубокими скважинными зарядами ВВ с проходкой рудных штреков гидровзрывным или традиционным буровзрывным способом и одновременной полной механизированной закладкой выработанного пространства пустыми породами.

5. Впервые для сложных горно-геологических условий высокогорья предложена технология формирования и отработки техногенных месторождений корунда, позволяющая создать техногенное месторождение совместно с формированием отвала горных пород максимальной емкости и устойчивости, а также повысить экологическую безопасность проводимых горных работ и обеспечить максимальное извлечение полезного компонента при последующем выщелачивании созданного техногенного месторождения.

6. Обосновано применение технологии управления качеством добываемых благородных корундов из коренных пород различных генетических классов в сложных горно-геологических условиях высокогорья с использо-

ванием люминесценции и оптической сортировки, позволяющее уменьшить потери корундового сырья.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждаются:

– использованием при проведении экспериментальных исследований аппаратного обеспечения с высокими метрологическими характеристиками;

– представительным объемом экспериментальных исследований на образцах корундов различных генетических типов из многих стран мира, собранных автором в разные годы;

– применением компьютерного моделирования в аттестованных пакетах программ;

– удовлетворительным совпадением результатов исследований различными методами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы горно-геологические и горнотехнические условия формирования типовых месторождений благородных корундов, что позволило усовершенствовать промышленно-генетическую классификацию месторождений группы корундов.

2. Поскольку корунд представляет собой минерал широкой области использования, помимо драгоценных разновидностей, предложено в промышленной классификации месторождений твердых полезных ископаемых отнести его также к классу «индустриальное сырье» группы «корунд».

3. Для сложных горно-геологических и горнотехнических условий месторождений усовершенствованы методы в области разработки крутопадающих маломощных жил с благородным корундом и предложен новый метод отработки месторождений уступной выемкой с отбойкой руды глубокими скважинными зарядами ВВ и проходкой гидровзрывным способом рудных штреков (или традиционным буровзрывным) с одновременной полной механической закладкой выработанного пространства пустыми породами, что позволяет уменьшить экологическую нагрузку на среду обитания человека и исключить из процесса проходки подготовительные горные выработки.

4. Лабораторными испытаниями корундсодержащих комплексов установлено, что наилучшие результаты селективного дробления корундсодержащих руд достигаются при реализации режимов всестороннего сжатия, в том числе при сжатии в слое.

5. При проведении исследований корундсодержащих руд месторождений Хитостров и Снежное проанализированы структурные особенности пород и физико-химические характеристики минералов. Установлены пороги выделения областей, принадлежащих корунду в наиболее распространенных для использования цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS, позволяющие использовать их при оптической сортировке.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Обоснованы промышленно-генетические типы корунда и показан механизм развития процессов корундообразования, а также вариации вещественного состава корундовых комплексов, что позволяет использовать полученные данные в проектной документации на постановку ГРР в перспективных районах России на благородный корунд.

2. Определена эффективность селективного дробления при использовании различных режимов силового воздействия, что имеет важное практическое значение для разработки технологий извлечения ценных минералов.

3. Установлено, что отбойка руды по контурам рудных крутопадающих тел при системе разработки с магазинированием и отбойкой руды глубокими скважинами приводит к потерям полезного ископаемого.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в проведении работ на всех этапах научных исследований: постановка цели и задач, разработка методик теоретических и экспериментальных исследований, их проведение, анализ и обобщение. Фактический материал работы основан на результатах поисково-оценочных и тематических работ, проводившихся с участием автора на месторождении Снежное и на аналогичных проявлениях на протяжении последних 20 лет. Автором составлена схема размещения месторождений и крупных проявлений корундов мира.

Апробация результатов работы.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях и симпозиумах:

- XX, XXII и XXIV международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2012, 2014 и 2016 г.г.);
- международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (Санкт-Петербург, 2015г.);
- международном семинаре РУДН (Москва, 2015 г.);
- II международной научной школе академика К.Н. Трубецкого (ИП-КОН РАН, Москва, 2016 г.);
- XIII международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле», (Москва, МГРИ-РГГУ, 5-7 апреля 2017 г.);
- XIV международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее», (Москва, МГРИ-РГГУ, 4-6 апреля 2018 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 33 печатных работах, включая 23 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и в трех патентах на изобретение.

Объем и структура работы. Работа состоит из семи глав, введения и заключения, 290 страниц, содержит 24 таблицы, 117 рисунков и список литературных источников из 183 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту профессору КарНЦ РАН В. В. Щипцову, доктору ф.-м. наук В.А. Винникову, профессорам НИТУ «МИСИС» А.С. Вознесенскому, В.А. Белину, Е.Б. Черепецкой, А.А. Еременко и всем другим ученым за ценные советы и доброжелательную критику по работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализирована степень разработанности темы диссертации в части классификации месторождений корундов.

На основании проведенных исследований было определено, что существующая классификация благородных корундов не учитывает наличие на месторождениях высокогорья благородных корундов отличных генетических групп. В связи с этим разработана новая классификация месторождений твердых полезных ископаемых в которой представлены два дополнительных класса индустриального сырья группы «корунд» в виде полигенных корундообразующих комплексов и показана в работах Е.П.Мельникова, Г.Брауна, Е.Я. Киевленко, Л.Н.Россовского.

Проведена систематизация и обобщение имеющихся материалов и собственных данных по месторождениям благородных корундов с учетом высокогорья к существующим основным пяти генетическим группам добавлены еще две дополнительные группы: моногенные (обломочные породы) и полигенетические (глубоководные) на основании проведенных электронно-микроскопических исследований кристаллов корунда (образцы собраны с 36 месторождений мира), в результате были получены спектры ЭДС, а также осуществлено картирование отдельных участков по химическому составу.

Показана четкая генетическая детерминированность химизма, физических свойств и парагенетических минеральных ассоциаций благородных корундов различного генезиса. Выделены типоморфные минералы, которые рассматриваются как индикаторы генетической, региональной и объектной принадлежности конкретных рубинов и сапфиров, что может быть использовано в их диагностике и оценке, а также в таможенном, следственном, коммерческом деле и в других целях (рисунок 1).



Рисунок 1 – Предлагаемая классификация минералов корундовой группы

Во второй главе рассмотрены физические и химические параметры корундов на технологическом уровне

Корунд представляет собой единственную природную модификацию с так называемым корундовым мотивом упаковки атомов Al и O. Его кристаллы обладают целым рядом особенностей по твердости, окраске и оттенкам. Химический состав корунда отвечает формуле Al_2O_3 , в нем обычно в небольшом количестве присутствуют примеси железа, титана, хрома, ванадия и др. Часто содержит включения рутила, гематита, ильменита, граната, шпинели др.

Окраска корунда очень разнообразная и зависит от примесей элементов-хромофоров. Химически чистый корунд бесцветен. Красная расцветка всевозможных интенсивностей и оттенков обоснована наличием примеси хрома (Cr^{3+}), изоморфно замещающего алюминий (Al^{3+}) в алюмоокислородных октаэдрах, а синяя, голубая, зеленая, фиолетовая, оранжевая, желтая и другие также различной интенсивности – примесями титана (Ti^{4+}), железа (Fe^{2+} , Fe^{3+}), временами марганца (Mn^{4+} , Mn^{3+}) и хрома (Cr^{3+}). Из других примесей-хромофоров присутствуют еще ванадий, иногда никель и медь.

Благодаря использованию современной приборной базы были получены оригинальные физические и химические данные по благородным корундам. Например, прецизионное изучение микроэлементного состава (со-

держания элементов-примесей и рассеянных элементов) корундов проведено на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 Termo. На спайд-диаграмме (рисунок 2) видим в основном одинаковую тенденцию при некотором преобладании легких элементов с четко выраженной отрицательной европиевой аномалией.

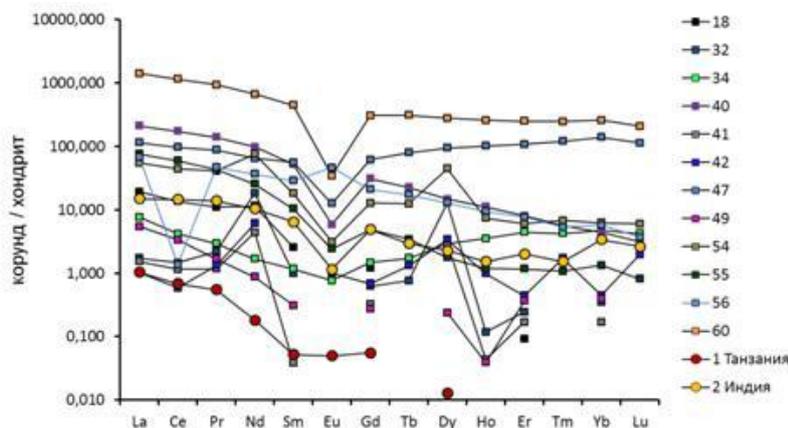


Рисунок 2 – Мультиэлементная спайд-диаграмма корундов мира. Нормализованное по хондриту (Thompson, 1982) содержание элементов-примесей, ppm: 18 – корунд, Танзания «winza»; 32 – синий корунд, остров Ольхон, Байкал, Россия (магматический); 34 – лейкосапфир, Амбуситра, Мадагаскар (хлоросапфир); 40 – розовый корунд, Gairo Morogoro, Танзания; 41 – корунд, Jegdalek), Афганистан; 42 – корунд черный (корундоносный гнейс), Майсур, Южная Индия (метаморфический); 47 – рубин, Майсор, штат Карнахака, Индия (метаморфический), 49 – корунд, Майсор, штат Карнахака, Индия (метаморфический); 54 – корунд (рубин), Модроса, Индия; 55 – рубин с астеризмом, Модроса, Индия; 56 – корунд розовый зональный, Илакака, Мадагаскар; 60 – рубин (в гнейсе), Мадагаскар; 1 – Танзания; 2 – Индия

Анализ корундсодержащих комплексов показывает закономерности локализации и связь с различными условиями генезиса, что становится актуальным при поисках коренных образований с заметным уменьшением потенциала россыпей благородного корунда. Расширяются области применения технического корунда. При комплексной горно-геологической оценке корунд доступен для освоения при благоприятных технологических, экономических и экологических факторах для получения корундов различного назначения.

В третьей главе проанализированы горно-геологические условия и горнотехнические особенности разработки месторождений корундовой группы.

Месторождения корунда различных типов, в том числе россыпные, известны практически на всех континентах мира. Часть из них были объектом интенсивной разработки с давних времен и к настоящему времени це-

ликом выработаны. Корунд устойчив в процессах денудации и накапливается в россыпях.

На рисунке 3 дана обобщенная аналитическая схема размещения наиболее крупных районов отработанных, ныне действующих и перспективных на ближайшее время месторождений корундовых руд мира. Приводимая схема отражает как историческое прошлое, так и состояние на текущий момент. В основу выбора объектов положены принципы полноты изучения, равной достоверности, последовательных приближений, минимальных затрат с учетом разнообразия горно-геологических условий.

Региональные геологические особенности представляют важную базу для обоснования результатов горно-геологических исследований в области освоения корундовых руд, изложенных в последующих главах диссертации. В частности, резюмируется геодинамика важнейшего события в тектонической эволюции региона «Высокая Азия», выраженная подъемом к поверхности в неоген-четвертичное время глубинных пород. Отмечается роль тектонической эрозии огромной мощности, что привело к выделению флюидов и предопределило формирование разнообразных метасоматитов, в том числе и корундосодержащих. Размещение магматогенных, метаморфогенных и иного генезиса месторождений и проявлений рубина и сапфира в Тихоокеанском поясе и на Австралийской плите также носит закономерный характер.

Горно-геологические условия месторождения существенно влияют на выбор способа вскрытия и технологию его разработки. На практике добыча коренных корундовых руд может сталкиваться с анизотропными инженерно-геологическими особенностями. Эти особенности зависят от состава руд, литологии покровных отложений, трещиноватости, тектонической нарушенности, выдержанности, текстурно-структурных свойств пород, рельефа местности и других факторов. Конечно, разработка именно корундосодержащих россыпей является более дешевым способом, но богатые россыпи, как правило, отработаны. Перспективы поисков новых месторождений корунда связаны с коренными месторождениями. Предлагаются различные способы разработки для условий освоения коренных месторождений корунда. Подобные месторождения расположены в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях разработки. Высокое качество, стоимость корундового сырья и преобладающая возможность штольневого вскрытия месторождений способны в определенных обстановках обеспечить высокую прибыльность разработки и минимальные сроки окупаемости серьезных инвестиций.



Рисунок 3 – Схема размещения месторождений и крупных проявлений корундов мира (составлена автором, 2016).

Легенда к рис. 3:

Австралия и Океания: 1 – Новая Зеландия; 2 – Новый Южный Уэльс, Инверелл, Нью-Касл; 3 – Квинсленд, Анака, Кингс-Плейнс; 4 – Остров Тасмания; 5 – Алис-Спрингс, штат Виктория; 6 – Север Австралии, г. Хартс-Рейндж; 7 – Запад Австралии, Пуна, Субера. **Таиланд:** 8 – Чантхабури; 9 – Мантабури; 10 – Сисакет, Бо Плой; 11 – Пхрэ, Ленчай. **Камбоджа:** 12 – Пайлин + Лампхата. **Лаос:** 13 – Бан Хоуайксай, Лаотян. **Мьянма:** 14 – Могок; 15 – Мандалай; 16 – Монг-Хсу. **Вьетнам:** 17 – Монг-Йен, Кайчау. **Китай:** 18 – Хейлудзянь; 19 – Хэбей; 20 – Цзянсу, Шанлуны, Фуцзянь. **Япония** 21 – остров Сикока; 22 – Сычуань и Юнань. **Россия:** 23 – Приморье, Красноармейский район, Первомайское проявление; 24 – Междуречье Большой Уссурки и Бикина, Незаметнинское месторождение. **Шри-Ланка:** 25 – Ратнапура. **Индия:** 26 – Майсур, Кукурт; 27 – Кашмир, Сумджан; 28 – р. Хунза; 29 – Калахандри; 30 – Раджастхан, Джанвали; 31 – Пипр; 32 – Махараштра и Тамилнад. **Непал:** 33 – Катманду, Тапленджунг; 34 – Ганеш. **Афганистан:** 35 – Джегдалек. **Пакистан:** 36 – Тимаргарха, 10 месторождений. **Таджикистан:** 37 – Восточный Памир, Мургаба. **Киргизия:** 38 – Туркестанский хребет, р. Орамазансу. **Казахстан:** 39 – Семиз-Бугу. **Россия:** 40 – Тува, Хансунгское проявление; 41 – Мыс Будун, остров Ольхон; 42 – Якутия, Чайнытское месторождение. **ЮАР:** 43 – Намаква-

ленд, Судинами-Спрёйт, Трансвааль. **Зимбабве:** 44 – Зимбабве. **Замбия:** 45 – Сомбуле. **Малави:** 46 – Чивандзубу. **Руанда:** 47 – Руанда. **Мадагаскар:** 48 – юг Мадагаскара и новые открытые месторождения; 49 – Центр, Антанифотси; 50 – север Мадагаскара, Амбилубе + Адиламсия + Морангама. **Конго:** 51 – Киншаса. **Танзания:** 52 – Мотомбо, Морогоро; 53 – р. Умбра; 54 – Маджи-Мотою. **Кения:** 55 – Цаво; 56 – Гарба Тула, Лодвар; 57 – озеро Турка. **Нигерия:** 58 – Кадуна, округ Джудит-Бейсин. **Сомали:** 59 – Боорама. **Македония:** 60 – Прилеп. **Россия:** 61 – Вишневые горы; 62 – Южный Урал, Борзовская россыпь; 63 – Ильменские горы; 64 – Средний Урал, Корнилов лог; 65 – Полярный Урал, Рай-Из, месторождение Макара-Рузь; 66 – Северная Карелия, Дядина гора; 67 – Северная Карелия, Хитостров; 68 – г. Эвелочгорр, Хибинский щелочной массив. **Шотландия:** 69 – Лох-Роуг, остров Льюис. **Финляндия:** 70 – Кителя. **Бразилия:** 71 – штат Санта-Катарина, Барра-Велха; 72 – штат Мату-Гросу де Сул, район Рио-Коксим; 73 – штат Сан-Паулу, Итаки; 74 – штат Минас-Жерайс, район Триангола-Минейро; 75 – штат Гояс; 76 – Байя, район Ситид-да-Юнибоя. **Колумбия:** 77 – Меркадерс-Рио-Майо. **США:** 78 – Миссури; 79 – Северная Каролина; 80 – Франклин, Коун-Вэлли; 81 – штат Монтана, месторождение Його-Галг. **Канада:** 82 – Онтарио, Кови-Крик; 83 – округ Ренфу; 84 – остров Баффинова Земля. **Гренландия:** 85 – Фискенессет

Рудные тела имеют как крутое, так и горизонтальное, пологопадающее и наклонное падение. Мощность рудных тел (зон) весьма изменчива – от 1 до 7 м и более. Месторождения характеризуется разнообразием физико-механических свойств руд и вмещающих пород. Коэффициент крепости их колеблется от 3 до 20 по шкале проф. М. М. Протодьяконова, а средний доминирующий коэффициент крепости равен 8–12. Руда и вмещающие породы характеризуются непостоянной устойчивостью.

Важную роль в горной промышленности играет прогнозирование динамических проявлений горного давления. В России прогнозированием динамических проявлений горного давления занимаются многие научные учреждения.

В диссертации приводятся краткие петрографические характеристики корундов с нескольких месторождений мира, имеющие важное отношение к разрушению горной породы, и даны горно-геологическая и горнотехническая характеристики опорных месторождений корундовых руд. Один из таких объектов – это важный центр мирового рынка рубинов высокого качества, район Могок (Мьянма). С учетом горно-геологических особенностей и климатических условий страны, находящейся в тропической зоне, такой комплекс мог бы быть преобразован в эталонный при разработке фундаментального понятия «разобренное месторождение» с установлением горнотехнических закономерностей для этого типа месторождения (рисунок 4, а). В экономическом отношении суммарный объем корундовой руды в разобренном месторождении должен обеспечивать полную амортизацию гор-

нодобывающего комплекса, а минимальное промышленное значение при этом должно обеспечить возврат не только эксплуатационных затрат, но и затрат по маневрированию с одной залежи на другую при абсолютно плохих дорожных условиях.



Рисунок 4 – Ландшафты корундоносных районов высокогорья:
а – типичный ландшафт в местах проведения горных работ по добыче корундов (район Могок, Мьянма); б – карьер на месторождении Снежное (слева видна поверхность напластования, контролирующая размещение Верхней продуктивной зоны), фото автора; в – горный ландшафт, массив Рай-Из (фотография «в» взята по адресу <https://uraloved.ru/mesta/sever-urala/massiv-raj-iz>)

К древнейшему району добычи благородного корунда относится остров Шри-Ланка, где наряду с коренными месторождениями в мраморах и гнейсах вокруг г. Ратнапура находятся богатейшие россыпи рубина и сапфира. Здесь найдены голубые и синие камни. В Шри-Ланке произведены на свет самые большие сапфиры в мире. Сапфиры из области Ратнапура отличаются наличием рутилового «шелка», слабой трещиноватостью, наиболее полной кристаллизацией среди всех сапфиров и почти полным отсутствием значительных по размеру газовых и газовой-жидких включений.

Месторождение рубина Снежное (Таджикистан) относится к типичному объекту горной системы Памира (рисунок 4, б). Стратифицированные образования месторождения представлены метаморфическими породами нижнего протерозоя, рассматриваемыми в качестве верхней части кристаллического фундамента Южного Памира, и отложениями его фанерозойского чехла. Последние слагают практически непрерывный разрез терригенно-вулканогенно-карбонатных пород от кембрия до палеогена. Месторождение локализовано в кальцитовых мраморах сарыджилгинской метаморфической серии. На данном участке в разрезе свиты закартировано пять пачек мраморов мощностью от 150–180 до 250–300 м (рисунок 5).

Количество корунда-сырца, извлекаемого из одного «гнезда» (раздува зоны) колеблется от 20 г до 50 кг. Выход кондиционного (ювелирного) материала из корунда-сырца – от 0 до 10 %, в среднем 0,9 %. Значение месторождения существенно увеличивает коллекционный материал, представленный крупными кристаллами и друзами кристаллов ярко-красного корунда. Потенциальные запасы рубина на месторождении делают его крупнейшим объектом в Высокой Азии.

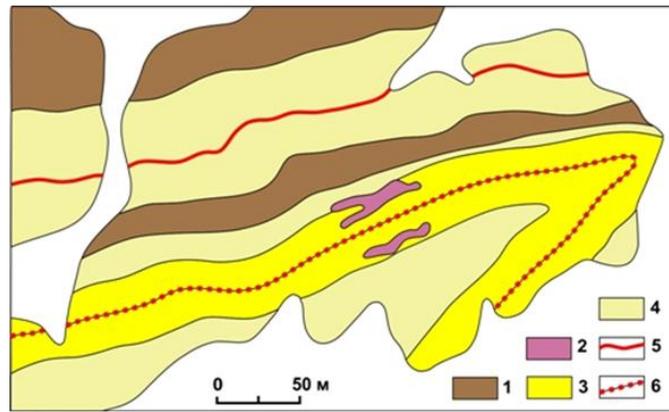


Рисунок 5 – Геологический план месторождения Снежное (составлен автором с использованием материалов Э. А. Дмитриева, 1987):
 1 – кристаллические сланцы; 2 – пегматиты; 3–4 – мраморы: 3 – кальцитовые, 4 – доломитовые; 5–6 – рубиноносные продуктивные зоны: 5 – Верхняя, 6 – Нижняя

Скопления полупрозрачного густо-красного рубина в жилах флогопитовых слюдитов встречаются в гипербазитовом массиве Рай-Из (Полярный Урал). Плагноклаз-рубиновые тела развиты в южном эндоконтакте массива в основании дунитового горизонта, где широко распространены линзы гигантозернистых дунитов и шпирь хромита. Плагноклазитовые тела с рубином локализуются в узлах пересечения тектонических трещин меридионального и северо-восточного простирания. Длина тел – 30 м, мощность – 20–22 м, падение – под углом 50–85°. Кристаллы темно-красного цвета, пластинчатые или же бочонковидные, размер кристаллов – 1–15 см в поперечнике. Рубин полупрозрачен, переполнен тонкими включениями хромшпинелидов, плагноклаза и слюды и подходит только для применения в качестве коллекционного материала. Бездефектные, но мелкие кристаллы рубина наблюдаются в слюдит-рубиновых жилах.

Рубины месторождения Незаметнинское относятся к полигенным минералам. Они кристаллизовались как непосредственно из магматического расплава, так и в результате процессов метаморфизма и метасоматоза. Данный факт стал основной причиной включения этого отечественного месторождения в наше исследование.

Рубины данного месторождения кристаллизовались как непосредственно из магматического расплава, так и в итоге процессов метаморфизма и метасоматизма. Кристаллизация корунда происходила в интервале температур 780–820 °С и давлений 1,7–3,0 кбар. Наличие высокоглиноземистых разностей между гранитоидов Незаметнинского штока, обнаружение в них и связанных с ними метасоматитах акцессорного корунда разрешает рассматривать эти породы в качестве основного коренного источника корунда.

Наиболее продуктивное из проявлений корунда Карелии – месторождение Хитостров – содержит до 5–7 % коллекционных кристаллов корунда. Основная масса корунда Хитострова представлена призматическими кристаллами длиной 1–5 см и толщиной 0,5–3,0 см. Цвет его розовый различ-

ных оттенков, малиновый, фиолетовый. Заметно выражен дихроизм с изменением окраски от серовато-розовой до ярко-розовой и малиновой.

В четвертой главе проанализированы геомеханические условия разработки коренных месторождений корунда.

В силу особенностей своего геологического строения, сложных горно-геологических и горнотехнических условий освоения коренные месторождения корунда, расположенные, как правило, в высокогорных районах, в настоящее время не являются привлекательными объектами для инвестиций. В то же время высокое качество, стоимость сырья и преобладающая возможность штольневого вскрытия месторождений должны обеспечить высокую прибыльность разработки и минимальные сроки окупаемости серьезных вложений. Проблема в том, что в районах расположения месторождений на большой высоте в труднодоступных местах отсутствуют вода, электричество, наблюдается недостаток кислорода в атмосфере.

Месторождения данного типа осваиваются, как правило, вручную, с использованием при отбойке руды зубил, кувалд и молотков, а также примитивных средств взрывания и взрывчатых материалов. В забоях, в частности, производятся взрывы минных зарядов, колодцы под которые делаются вручную. Применение минных зарядов способствует формированию техногенных трещин во вмещающем рудное тело массиве. После взрыва происходит деформирование выработок, в них наблюдаются частые случаи внезапного обрушения разуплотненных взрывом горных пород, которые очень редко крепятся из-за отсутствия крепящего материала в горах и трудности его доставки.

Первостепенное значение приобретает вопрос улучшения технологии подземной разработки месторождений корунда, эффективность которой предопределяет технико-экономические показатели всего предприятия. В настоящее время в направлении на комплексной механизации основных технологических процессов, обеспечивающих поточность процесса очистной выемки с учетом полноты и качества извлечения руды, предъявляются жесткие требования к выбору систем разработки, особенно месторождений со сложными горно-геологическими условиями. Автор непосредственно участвовал в работах, связанных с добычей благородных корундов в отдельных районах Высокой Азии, поэтому в диссертации использует приобретенный опыт, в частности, на примере месторождения Снежное на территории бывшего СССР (ныне Таджикистан) обращено внимание на специфику взрывной отбойки и конструктивное оформление систем разработки рассматриваемых месторождений.

Исследования проводилась комплексным методом на основе обобщения отечественного и зарубежного опыта горных работ и анализа горнотехнических условий разработки жильных месторождений, лабораторных и производственных экспериментов и технико-экономической оценки, полу-

ченные В. Ш. Кравченко, В. В. Куликовым, С. Ю. Соболевым, М. М. Хайрутдиновым, В. Н. Хайрутдиновой, В. И. Хомяковым и др.

Рудные тела имеют как крутое, так и горизонтальное, пологопадающее и наклонное падение. Мощность рудных тел (зон) весьма изменчива – от 1 до 7 м и более. Требуется точное оконтуривание рудных тел опробованием из горных выработок. Оказывается практически неприемлемой отбойка руды по контурам крутопадающих рудных тел при системе разработки с магазинированием и отбойкой руды глубокими скважинами.

Месторождения характеризуются разнообразием физико-механических свойств руды и вмещающих пород. Коэффициент крепости их колеблется от 3 до 20 по шкале проф. М.М. Протодьяконова, а средний доминирующий коэффициент крепости равен 8–12. Крепость вмещающих пород с удалением от зон оруденения возрастает. Руда и вмещающие породы характеризуются непостоянной устойчивостью, поэтому в условиях месторождений очень важно установить предельную величину обнажений, обеспечивающую устойчивость выработанного пространства при очистной выемке. Первые рекомендации управления кровлей путем массового принудительного обрушения междукамерных целиков и потолочин с выпуском замагазинированной руды под обрушенными налегающими породами нецелесообразны, ввиду возможных больших потерь руды.

Проведенный анализ позволил установить, что:

1) система разработки с магазинированием руды не может быть рекомендована, если руда склонна к слеживанию;

2) система разработки с выемкой камер горизонтальными слоями с закладкой пустыми породами, с деревянными настилами из-за существенных недостатков (малой производительности, большой трудоемкости, потерь корундов в закладке) также не может быть рекомендована;

3) массовый выпуск руды из блоков рекомендуется производить под налегающими пустыми породами при невыдержанных элементах залегания, склонности руды к слеживанию, сложной форме рудных тел, наличии прослоев пустых пород, что оказывает свое отрицательное влияние;

4) рекомендованные российскими учеными системы разработки и технологии очистной выемки не обеспечивают сохранности включений прослоев пустых пород, необходимого оконтуривания рудных тел при отбойке руды скважинными зарядами, а следовательно, и полноту выемки. Кроме того, рекомендованные системы разработки характеризуются сравнительно низкими технико-экономическими показателями.

Для обеспечения плановой добычи руды на рудниках при условии крутого падения рудных тел необходимо уточнение решений по системам и технологии разработки с учетом достижений науки и техники в данной области, результаты которых опубликованы в ряде работ Д. Р. Каплунова, А. В. Будько, А. С. Воронюка, М. В. Рыльниковой и др. Разработка крутопадающих маломощных месторождений часто ведется в разнообразных горно-геологических условиях: руды и вмещающие породы имеют различ-

ную крепость и устойчивость, элементы залегания рудных тел меняются в широких пределах. В Канаде и ЮАР разработка данных месторождений практически полностью ведется подземным способом. В ЮАР на четырех рудниках ведут разработку месторождений на глубине свыше 2500 м и на семи рудниках – от 2000 до 2500 м.

Удельный вес добычи руд в России и за рубежом различными системами разработки в условиях освоения крутопадающих маломощных рудных тел представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Доля различных систем подземной разработки при добыче минералов корундовой группы, %

Доля систем разработки					
с открытым выработанным пространством	с магазинированием	с обрушением	с креплением	с закладкой	других систем
25	22	2	12	23,5	15,5

В связи с широким внедрением закладки твердеющей смеси с применением высокопроизводительного самоходного оборудования возобновилась разработка месторождений, ранее считавшихся неэкономичными. Отработка ведется на всю длину рудного тела (150–400 м) без оставления целиков. Подготовка блоков осуществляется полевой наклонной выработкой, обеспечивающей быстрое передвижение самоходного оборудования из слоя в слой. Следовательно, для решения поставленной задачи целесообразно принять комплексный метод, состоящий из следующих блоков:

- лабораторное исследование физико-механических свойств и выбор твердеющей смеси для закладки выработанного пространства, физико-химическое изучение твердеющей смеси, исследование технологии приготовления и транспортирования смеси;

- натурные эксперименты по взрывной отбойке, хронометражные наблюдения за бурением скважин, выпуском и доставкой руды с целью получения необходимых величин для оценки и выбора рациональной технологии очистной выемки и параметров систем разработки.

Лабораторные исследования по выбору закладочной смеси направлены на изучение свойств промышленных отходов и местных строительных материалов с целью выбора экономичных вяжущих и заполнителей для приготовления твердеющей смеси и установления рационального состава твердеющей смеси, отвечающей условиям прочности, транспортабельности и экономичности.

Изучались свойства промышленных отходов, местных строительных материалов. Методом отбора проб проводился их химический анализ и

устанавливался вещественный состав материалов. Целесообразность использования промышленных отходов в качестве вяжущих для приготовления твердеющей смеси оценивалась существующими методами. Промышленные отходы обычно содержат окислы кальция, магния и глинозем, которые относятся к активным поглотителям воды. Кроме того, в их состав входит также кремнезем, который снижает вяжущую активность материала. Содержание этих окислов в отходах производства хотя и характеризует качественные свойства материала, однако не является достаточным критерием для обоснованного выбора вяжущих, так как вещество может отличаться скрытыми свойствами к твердению.

В процессе исследования выявляются факторы, оказывающие влияние на прочностную характеристику закладки и устойчивость смеси (суспензии). В результате получаем смеси различных составов, анализ которых позволяет выбрать наиболее экономичные.

Производственные исследования являются необходимым этапом работ в связи с тем, что ряд задач сложно решить в лабораторных условиях. К ним относится, в частности, вопрос установления фактического влияния подвижности смеси на ее транспортабельность. В результате производственных исследований рекомендуется технология приготовления и транспортировки смеси.

Проводились эксперименты по взрывной отбойке, выпуску и доставке руды в связи с тем, что руда и вмещающие породы месторождений разбиты густой сетью природных трещин и некоторые склонны к слеживанию. Необходимо выбрать рациональный диаметр скважин, сетку их расположения и способ взрывания, обеспечивающие при умеренном дроблении руды выемку с малыми потерями и минимальным разубоживанием.

Исходными данными для оценки руды и выбора рациональной технологии выемки и параметров систем разработки служат результаты экспериментальных работ в производственных условиях, данные хронометражных наблюдений и обработки материалов. В результате проведенных экспериментальных работ и их оценки устанавливается рациональная технология очистной выемки, обеспечивающая эффективные показатели по производительности труда, качеству и полноте извлечения руды.

Опытные работы по изучению закономерностей дробления руды при отработке камер с выемкой запасов проводились системой с магазинированием руды, а отбойка осуществлялась в одних камерах скважинными способами, в других – шпуровыми зарядами.

Отбойка руды в камерах велась горизонтальными слоями с помощью скважинных зарядов диаметром 75 мм с сеткой их расположения 2×2 м. В качестве ВВ использован аммонит 6 ЖВ. Выход негабарита при этом составил 16,2 %, а разубоживание (в результате присадки вмещающих пород) – 14,3 %. Удельный расход ВВ на отбойку составил 1,51 кг/м³, на вторичное дробление руды – 0,204 кг/м³.

В таблице 2 показаны результаты дробления руды при отбойке горизонтальными слоями в камерах с применением замедленного и короткозамедленного способов взрывания. Очевидно, что применение короткозамедленного взрывания способствует улучшению качества дробления руды и снижению разубоживания. Выход негабарита уменьшается примерно в 1,6 раза.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных работ по изучению закономерностей дробления руды при камерной системе разработки

Сетка расположения зарядов, м	Удельный расход ВВ на отбойку, кг/м ³	Диаметр заряда, мм	Гранулометрический состав, %			
			до 50 мм	50–400 мм	400–600 мм	свыше 600 мм
Обычное взрывание при рядовой отбойке						
2×2	1,51	75	16,0	64,0	4,8	16,2
Короткозамедленное взрывание при рядовой отбойке						
2×2	1,51	75	20,0	63,0	6,8	10,2

Опытные работы по изучению специфики отбойки и закономерностей дробления руды проведены при поэтажной выемке в блоках. На рисунке 6 представлен порядок выемки руды из блоков при различных значениях мощности рудного тела.

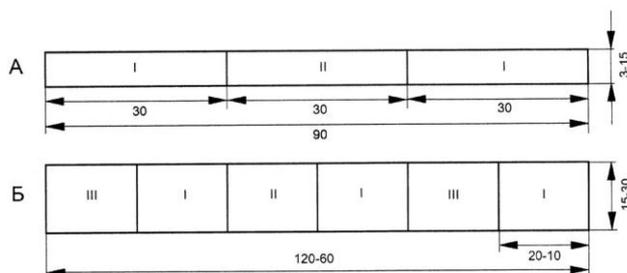


Рисунок 6 – Порядок выемки руды из блоков при мощности рудного тела:
А – 3–15 м; Б – 15–30 м.

В блоках проведены пять серий экспериментальных взрывов по отбойке руды вертикальными слоями. В очистных камерах выполнено всего 35 экспериментальных взрывов. В 28 экспериментах фиксировались фактические параметры буровзрывных работ (сетка расположения зарядов, их вес, схема взрывания и др.) и установлены выход негабарита и разубоживание руды. Первая серия экспериментов (таблица 3) предусматривала установление зависимости между удельным расходом ВВ (аммонита 6 ЖВ), выходом негабарита и величиной разубоживания при рядовой отбойке зарядами в скважинах диаметром 85 мм.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных работ по отбойке руды в блоке с параллельным расположением скважин и л.н.с. 2 м

Показатель	Единица измерения	Номера опытов		
		1	2	3
Объем отбитой руды:				
проектный	м ³	124	122	120
фактический	м ³	135	134	132
Длина слоя	м	10	10	10
Ширина слоя	м	6,2	6,1	6,0
Общая длина скважин	м	32,0	32,3	32,5
л.н.с.	м	2	2	2
Расстояние между скважинами	м	2	2	2
Диаметр скважины	мм	85	85	85
Удельный расход ВВ на отбойку	кг/м ³	1,105	1,123	1,141
Выход руды с 1 м скважины	м ³ /м	3,87	3,81	3,75
Выход негабарита	%	24	23	22
Разубоживание	%	9	10	8
Удельный расход ВВ на вторичное дробление	кг/м ³	0,302	0,29	0,277

В экспериментах данной серии сетка расположения скважин принята 2×2 м. Удельный расход ВВ на отбойку составил 1,10–1,14 кг/м³, на вторичное дробление – 0,27–0,30 кг/м³. Выход негабарита (куски размером свыше 600 мм) составил 22–24 % и разубоживание – 8–10 %. Ввиду большого выхода негабарита сетка расположения скважин в экспериментах второй серия была сгущена (1,8×1,8 м).

В экспериментах пятой серии (таблица 4) сетка расположения параллельных скважин была 1,5×1,5 м. Интервал замедления между рядами скважин принят 25 мс. В экспериментах данной серии установлен наименьший удельный расход ВВ на отбойку (0,77–0,85 кг/м³) и достигнуто лучшее дробление руды.

Очень важен при взрывной отбойке выбор способа взрывания зарядов. При выполнении экспериментов установлено, что применение короткозамедленного взрывания способствует снижению выхода как негабарита, так и мелких фракций руды. Интервал замедления между рядами скважинных зарядов в экспериментах равен 25 мс, он является оптимальным для рекомендуемых параметров взрывной отбойки с известными физико-механическими свойствами руды. Улучшение качества дробления при короткозамедленном взрывании обеспечивается за счет следующих основных факторов:

1) полное дробление руды в предыдущем слое и образование достаточного обнажения в момент отбойки последующего слоя;

2) образование предварительно напряженного поля с вызывающим ослабляющее действие на отбиваемый слой использования кинетической энергии соударения отделившихся от массива частиц руды;

3) использование кинетической энергии соударения отделившихся от массива частиц руды.

Таблица 4 – Результаты экспериментальных работ по отбойке руды в блоке с параллельным расположением скважин, короткозамедленным взрыванием и л.н.с. 1,5 м

Показатель	Единица измерения	Номера опытов		
		13	14	15
Объем отбитой руды:				
проектный	м ³	338	405	473
фактический	м ³	345	411	482
Длина слоя	м	10	10	10
Ширина слоя	м	7,5	9,0	10,5
Общая длина скважин	м	114	168	192
л.н.с.	м	1,5	1,5	1,5
Расстояние между скважинами	м	1,5	1,5	1,5
Диаметр скважины	мм	65	65	65
Удельный расход ВВ на отбойку	кг/м ³	0,85	0,83	0,81
Выход руды с 1 м скважины	м ³ /м	2,35	2,41	2,46
Выход негабарита	%	6,0	5,5	6,0
Разубоживание	%	2,0	1,5	2,0
Удельный расход ВВ на вторичное дробление	кг/м ³	0,076	0,069	0,079
Интервал замедления между рядами скважин	мс	25	25	25

В таблице 5 даны рекомендуемые рациональный диаметр скважин, сетка их расположения и способ взрывания, установленные в результате производственного изучения специфики взрывной отбойки.

Таблица 5 – Рекомендуемые параметры взрывной отбойки

Параметр	Единица измерения	Значение
Диаметр скважин	мм	65
Сетка расположения скважин	м	1,5×1,5
Короткозамедленный способ взрывания с интервалом замедления между рядами скважин	мс	25
Удельный расход ВВ на отбойку	кг/м ³	0,81

В результате экспериментальных работ установлена область рациональных параметров отбойки в условиях высокогорья (диаметр скважин 65 мм с сеткой их расположения 1,5×1,5 м и диаметр скважин 85 мм с сеткой их расположения 1,8×1,8 м), обеспечивающие нужное качество дробления руды и минимальный подрыв вмещающих пород (разубоживание).

Эти параметры неодинаковы по величине затрат труда и средств на единицу отбиваемой руды, в связи с чем необходима дополнительная оценка с точки зрения экономичности.

Наиболее простым и в достаточной степени точным является сравнение параметров взрывной отбойки по стоимости очистной выемки 1 т руды с учетом затрат на нарезные работы, бурение, взрывание, доставку и ущерб от недополучения прибыли за счет разубоживания руды.

Рассматриваем вариант предполагаемой автором разработки месторождений подземным способом. При отработке каждого этажа принятыми схемами можно рассмотреть две различные стадии нагружения закладочного массива на участках мощностью свыше 15 м, отличающихся наиболее неблагоприятными горно-геологическими условиями. Первая стадия – выемка запасов первичных камер под защитой междукамерных рудных целиков. Действовавшее на месте расположения очистной камеры давление не может больше передаваться из-за извлечения руды. Поэтому происходит перераспределение напряжений вокруг очистной камеры. При правильно выбранных параметрах очистная камера не обрушается, хотя вмещающие породы вблизи поверхностей обнажений деформируются. Заполнение выработанного пространства закладочным материалом оказывает механическое воздействие на окружающий горный массив. Характер и степень этого воздействия во многом определяются состоянием закладочного материала. Обычные твердеющие смеси дают усадку в результате фильтрации воды и отстаивания ее в верхней части камеры.

Предлагаемый закладочный материал представляет собой устойчивую суспензию, которая твердеет, набирая к месячному сроку прочность 3–4 МПа. Закладочный материал оказывает боковое давление на междукамерные целики, благодаря чему повышается их несущая способность. Экспериментально установлено, что в твердеющей смеси на основе пыли с пемзовым заполнителем отсутствует аутогенное отделение воды внутри смеси, поэтому она не может дать существенной усадки, а смесь уплотняется под воздействием собственного веса в процессе схватывания. Закладочный массив в первичных камерах будет воспринимать максимальные нагрузки от вышележащих пород (руды) после выемки междукамерных целиков – вторичных камер.

Элементы залегания рудных тел крутопадающих месторождений корунда не выдержаны, угол падения изменяется от 70 до 90°. В наиболее трудных условиях находятся участки закладочного массива, непосредственно примыкающие к очистной камере, вследствие наличия обнаженных поверхностей.

При крутом падении рудного тела закладочный массив будет испытывать в основном давление сверху, обусловленное весом пород в пределах прямоугольника CGKD (рисунок 7) и собственным весом; величина бокового давления в этом случае незначительна. В результате опытно-промышленной проверки расчета нагрузки на закладочный массив при вертикальном падении рудного тела произведен выбор технологии приготовления твердеющей смеси на основе пыли и песка, которая становится конкурентоспособной благодаря упрощенной схеме закладочного комплекса. Экспериментально изучен режим движения по горизонтальным трубопроводам предложенной твердеющей смеси с помощью сжатого воздуха и установлены технические параметры, обеспечивающие устойчивость потока смеси. На основе экспериментального изучения режима движения твердеющей смеси предложен метод расчета транспортного трубопровода. При закладке выработанного пространства составом, не предусматривающим водоотделение, обеспечивается минимальная усадка возводимого закладочного массива.

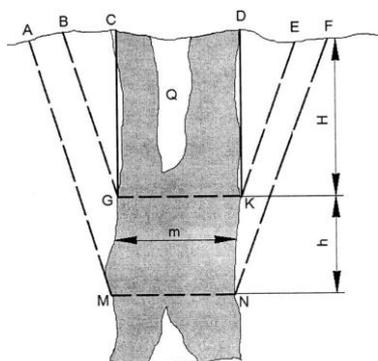


Рисунок 7 – Схема к расчету нагрузки на закладочный массив при вертикальном падении рудного тела

Результаты опытно-промышленных испытаний варианта камерно-целиковой системы с отбойкой руды из подэтажных выработок с последующей закладкой подтвердили предположение о надежности конструкции системы и эффективности технологии выемки. Техничко-экономические показатели указанной системы улучшатся при применении погрузочно-доставочных машин. Фактические потери и разубоживание при выемке первичных камер составили соответственно 3,2 и 3,6 %.

Решение этих вопросов проводилось комплексным методом, включающим, в частности, обобщение и анализ горнотехнических условий разработки месторождений корунда, анализ мирового опыта разработки подобных месторождений, производство натуральных экспериментов по взрывной отбойке, производственные наблюдения, анализы методик подбора состава твердеющих смесей на основе вяжущих из отходов производства, исследования физико-механических свойств твердеющих смесей, физико-химические исследования твердеющей смеси на основе пыли, выбор технологии приготовления твердеющей смеси, изучение пневмотранспорта смеси

и оценка экономической эффективности технологии системы с закладкой твердеющей смесью на основе пыли.

В результате экспериментальных работ, выполненных в производственных условиях, изучены закономерности взрывного дробления руды и разрушения вмещающих пород, на основе которых установлена рациональная схема отбойки руды вертикальными слоями с параллельным, иногда веерным, расположением скважин диаметром 65 мм. При сетке $1,5 \times 1,5$ м и удельном расходе ВВ на отбойку $0,81 \text{ кг/м}^3$ выход негабарита составляет 5–6 %, присадка пустых пород (разубоживание) – 2 %. Эффективность взрывной отбойки значительно повышается при применении короткозамедленного способа взрывании с интервалом замедления между рядами скважин 25 мс. При этом значительно сокращается выход негабарита и рудной мелочи, что весьма важно для слеживающихся руд, склонных к весьма неравномерному дроблению. Рекомендован механизированный вариант системы разработки горизонтальными слоями с закладкой для выемки участков рудных тел мощностью до 5 м и близко расположенных рудных тел такой же мощности.

Экспериментально изучены свойства отходов горнопромышленного производства и рекомендована в качестве вяжущего пыль. Исследован и рекомендован активный заполнитель – песок, значительно сокращающий расход вяжущих материалов.

В результате производственных испытаний по транспортировке твердеющей смеси с помощью сжатого воздуха предложен метод расчета параметров пневмотранспорта смеси по горизонтальным трубопроводам. Закладка выработанного пространства твердеющей смесью при разработке рудных тел сложной формы улучшает технико-экономические показатели и способствует расширению его производственной мощности.

По характеру контактов кристаллов корунда с материнскими породами на жильных месторождениях принято выделять четыре типа сочетания наиболее важных признаков (таблица 6). В практике наиболее распространены 2-й, 3-й и 4-й типы контактов

Для месторождений жильного типа характерно многообразие горно-геологических и морфологических особенностей: наличие апофиз, параллельных и сближенных рудных тел, неравномерность и прерывистость оруденения, изменчивость мощности, угла падения и азимута простираения, сложный минералогический состав, разнообразие физико-механических свойств руды и вмещающих пород и характера их контактов, существенно влияющих на показатели качества и полноты извлечения полезного ископаемого из недр.

Среди разнообразных морфологических типов месторождений, на которых осуществляется добыча корундов, большое распространение имеют жильные месторождения. Доля этих месторождений составляет более 50 %.

Таблица 6 – Типы контактов кристаллов корунда с материнскими породами на жильных месторождениях

Тип	Характеристика контактов
1	Ровные, четкие, слабые
2	Ровные, четкие, прочные
3	Извилистые, четкие, прочные
4	Извилистые, неясные, прочные

Для оценки потерь драгоценных камней в рудной мелочи и определения факторов, влияющих на величину этих потерь, были исследованы более 400 отработанных блоков. С лежачего блока очистного пространства было отобрано 1050 проб. Пробы по крупности рудной мелочи были разделены на фракции. Анализ на содержание драгоценных камней в разных фракциях показал, что при увеличении угла падения от 45–50° до 75° потери заметно понижаются и при углах свыше 80° становятся менее существенными. Потери драгоценных камней в рудной мелочи нередко достигают 12–15 % от общих запасов в блоке.

Действенным способом устранения потерь рудной мелочи является гидравлическая зачистка отработанных блоков, обусловившая широкое ее применение на отечественных и зарубежных рудниках.

Резкое повышение показателей эффективности можно обеспечить за счет комплексной механизации трудоемких технологических процессов, как основных, так и вспомогательных, и использования новейшего высокопроизводительного горного оборудования, совершенствования технологии и конструктивных составляющих систем разработки. Увеличение объемов добычи полезных ископаемых приводит к уменьшению запасов в недрах, поэтому рост производства корундов должен планироваться не только за счет расширения масштабов добычи и вовлечения в эксплуатацию новых месторождений, но и за счет более полного и рационального освоения минерального сырья на действующих предприятиях.

Одним из наиболее сложных объектов разработки являются наклонно падающие рудные тела малой мощности, залегающие в устойчивых вмещающих породах. В таких месторождениях сосредоточены значительные запасы корундсодержащего сырья.

Применение для их разработки камерных систем, предусматривающих нахождение людей и оборудования в выработанном пространстве, повышает опасность при выполнении технологических процессов.

Становится очевидным тот факт, что при выборе системы разработки важную роль играет правильное установление характеристик конструктивных элементов. При разработке рудных тел камерно-столбовой системой разработки потери руды в целиках составляют примерно 18–25 % при ширине 8 м и размерах целиков 5×5 или 5×6 м.

Как было установлено натурными испытаниями, при длине пролета камеры, равном 23 м, потери руды снизились в 3 раза, а производительность

труда рабочей забойной группы возросла почти в 2 раза по сравнению с показателями при отработке камер с длиной пролета 8 м.

При выделении участков исследования исходили из того, чтобы по возможности охватить имеющиеся горно-геологические особенности месторождения:

- залегание рудного тела;
- тектонические особенности рудного тела;
- глубина залегания рудного тела;
- мощность непосредственной кровли и ее состояние;
- количество оставленных в блоке целиков, их форма и размеры;
- площадь обнажения кровли, и если имели место вывалы, их описание;
- давность отработки.

Полученные решения должны обеспечивать высокую прибыльность разработки и минимизацию сроков окупаемости капитальных вложений.

В пятой главе обоснованы параметры геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья.

Техногенные месторождения представляют собой особый класс месторождений, сформировавшихся в последние столетия в районах горно-рудной промышленности. Классификация техногенных месторождений осуществляется по их принадлежности к отходообразующим предприятиям, технологическим стадиям производственного цикла, типам отходов, времени накопления, объемам, характеристике хранилища и собственно отходов, химическому составу, степени негативного влияния на окружающую среду, состоянию изученности отходов, перспективам использования и прочим характеристикам. При этом промышленную ценность могут представлять не только отходы непосредственной переработки руд и концентратов, но также отвалы вскрышных, вмещающих пород и забалансовых руд для извлечения из них полезных компонентов или использования в качестве строительных и других материалов. В особую группу выделяются техногенные месторождения, возникшие в результате разработки россыпных месторождений золота, платиноидов, алмазов, касситерита, вольфрамита и чей ресурсный потенциал оценивается достаточно высоко.

Впервые для сложных горно-геологических условий высокогорья предложена технология формирования и отработки техногенных месторождений корунда, позволяющая создать техногенное месторождение совместно с формированием отвала горных пород максимальной емкости и устойчивости, а также повысить экологическую безопасность проводимых горных работ и обеспечить максимальное извлечение полезного компонента при последующем выщелачивании созданного техногенного месторождения.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований в качестве альтернативы существующим технологиям освоения маломощных

жильных месторождений обоснованы параметры технологии гидроразрыва для освоения месторождений в сложных условиях. Разработаны характеристики и параметры бурогидровзрывных работ. За основу взяты параметры очистных лент (забоев) отработки горизонтальных и пологопадающих маломощных жил камерно-столбовой системой разработки. В случае необходимости сохранения целостности структурных блоков в условиях применения технологии гидроразрыва при освоении месторождений камерно-столбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных разрывом блоков с сохранением их целостности.

Для сложных горно-геологических и горнотехнических условий разработки крутопадающих маломощных жил разработан метод отработки месторождений уступной выемкой с отбойкой руды скважинными зарядами ВВ, с проходкой буровзрывным (бурогидровзрывным) способом рудных штреков (или традиционным буровзрывным) и одновременной полной механической закладкой выработанного пространства пустыми породами. Отработка разрешает провести наиболее полное извлечение запасов полезного ископаемого в восходящем порядке от нижней границы рудного тела (участка). Предложенный вариант освобождает от необходимости создания рудных потолочных целиков и предотвращает образование зон концентрации напряжений.

Предварительные работы включают проходку уклона (в лежащем боку рудного тела); проходку камер временного складирования руды (из главного уклона, например через каждые 100 м); проходку квершлагов, пройденных из главного уклона в сторону рудного тела в подэтажах. В квершлагах образуются камеры временного складирования руды и породы; проходка рудных штреков осуществляется бурогидровзрывным способом (рудный участок вскрывается до его границ); проводится крепление висячего бока (до начала добычных работ висячий бок упрочняется тросовыми анкерами с нижележащего штрека в подэтаже); проходятся отрезные щели. Для проходки отрезного восстающего применяется буровзрывной способ или проходка осуществляется механизированным комплексом, например Robbins.

Очистные работы включают отработку с последующей закладкой блоков максимальной длины с учетом физико-механических свойств руды и вмещающих пород, например, 25 м. Бурение глубоких скважин производится с вышележащего этажа. Для отбойки первых слоев в блоках, которые расположены на границах участка, сначала проходится отрезной восстающий. Последующая отбойка слоев ведется в сторону от механизированной закладки пустыми породами с целью создания свободного пространства. Часть пустой породы отбрасывается взрывом, что позволяет начать развертывание конвейерной ленты после проведения закладочных работ, поверх отвала пустой породы.

Погрузка отбитой руды осуществляется с помощью дистанционно управляемой погрузочно-доставочной машины. Руда доставляется в камеру

временного складирования, расположенную в квершлагае. В дальнейшем руда из камеры грузится в подземные автосамосвалы и транспортируется. Закладку из пустых пород доставляют в выработанное пространство с вышележащего штрека в подэтаже. Перед производством закладочных работ конвейерную ленту сворачивают для дальнейшего использования. Цикл операций повторяют до завершения отработки подэтажа.

В таблице 7 представлены данные по производительности бурового оборудования в условиях применения предлагаемого способа отработки для бурения нисходящих скважин буровыми установками импортного производства, например Simba или Tamrock.

Таблица 7 – Производительность бурового оборудования для условий применения разработанного способа

Оборудование	Производительность бурового оборудования
Буровая установка с двумя стрелами (бурение глубоких скважин)	240 м/мес. при одном забое
	260 м/мес. при двух и более забоях
Буровая установка с одной стрелой (бурение глубоких скважин)	180 м/мес. при одном забое
	180 м/мес. при двух и более забоях
Комплекс проходки восстающих	40 м/мес. на одну скважину
Бурение и установка тросовых анкеров	6000 м/мес.
Проходка рудных штреков бурогазодетонационным способом (при добыче корундов)	45 м/мес. при одном забое
Бурение глубоких скважин с применением предлагаемого способа	4500 м/мес.
Добыча руды с применением предлагаемого способа	6000 т/мес. на одну очистную выработку

Проведенные на горнодобывающих предприятиях исследования показали, что при проходке рудных штреков бурогазодетонационным способом и доставке руды в выработках, расположенных в лежачем боку месторождения, разубоживание составляет в среднем 5–7 %; при условии, что отбойка слоев ведется в сторону закладки, к разубоживанию необходимо добавить 40 % по первому взрываемому ряду и 20 % по второму.

В последние годы в связи с быстрым освоением множества месторождений разных геологических типов удельный вес жильных месторождений в добыче руд существенно сокращается. Более применимым вариантом отбойки руды является способ, при котором массив не подвержен воздействию взрыва. Для сохранения целостности рудин в качестве альтернативы существующим технологиям взрывной отбойки в настоящее время разрабатываются характеристики и параметры геотехнологии освоения корен-

ных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья, технологические схемы и технические способы гидроразрыва горных пород. Гидравлический разрыв – это процесс, при котором давление жидкости воздействует именно на породу вплоть до ее разрушения и возникновения трещины. Продолжающееся влияние давления жидкости расширяет трещину вглубь от точки разрыва. В закачиваемую жидкость может быть добавлен расклинивающий материал. Назначение этого материала – удержать созданную трещину в раскрытом состоянии после сброса давления жидкости.

В то же время во всех случаях использования гидроразрыва требуется детальная проработка технологических схем ведения работ, состава расклинивающего агента и параметров применяемого оборудования. Применительно к добыче корундов технология отбойки руды от массива горных пород с использованием гидроразрыва реализуется следующим образом. С учетом размеров выработки, очистного забоя (ленты) и отбиваемых блоков руды забой необходимо разделить горизонтальными и вертикальными трещинами на элементы требуемого размера, а также образовать трещину, перпендикулярную оси выработки, на определенном удалении от свободной поверхности. Причем диаметр перпендикулярной трещины перекрывает все сечение выработки. С учетом условий высокогорья и отсутствия силовых коммуникаций диаметр шпуров для разделения массива на блоки должен быть минимальным – около 12–16 (20) мм. По этой же причине при выборе насоса для закачки расклинивающего материала лучше ориентироваться на оборудование с ручным приводом. Для более точного объемного позиционирования трещин в массиве необходимо создать концентраторы напряжений, задающие направление развития трещин. При разделении на блоки потребуются щелеобразователи двух типов: продольные и поперечные. Продольные щелеобразователи, представляющие собой штыри с заостренными клиньями на цилиндрической поверхности, погружаются ударным способом в соответствующие шпуры на всю глубину, формируя зародыш трещины для продольного гидроразрыва. Концентратор напряжений для поперечного гидроразрыва создается на дне центрального шпура с помощью специального раздвижного механизма, поворот которого формирует иницирующую трещину, или с помощью заточенной тарельчатой пружины, которая погружается на дно шпура, а затем по ее торцу наносится удар, кромка пружины врезается в горный массив и образует зародыш поперечной трещины.

Гидроразрыв позволяет только разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения.

Эффективность разработанной технологии в сравнении с традиционной с применением взрывной отбойки руды подтверждается полученными результатами, представленными в таблице 8.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований для сохранения целостности рубинов в качестве альтернативы существующим технологиям освоения тонких и маломощных жильных месторожде-

ний обоснованы характеристики и параметры технологии гидроразрыва для освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья.

Таблица 8 – Сравнение эффективности применяемых технологий отбойки руды при освоении коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья

Параметр	Технология взрывной отбойки руды	Технология гидро-взрывной отбойки руды
Уход забоя за цикл, м	1,42	0,55
Объем извлеченной горной массы, м ³	4,26	1,65
Размер кусков отбиваемой горной массы, м	0,01–0,30 до 0,65	0,4–0,5
Расход ВВ, кг: аммонит бЖВ игданит	4,8 26	2 –
Разрушение кристаллов корунда при отбойке, %	80–90	10–20
Техногенная трещиноватость вмещающего массива при отбойке руды, м	До 0,55	0–0,1
Крепление кровли очистных камер на глубине 100–250 м	Анкер сталеполымерный или стале-минеральный	–

Для сохранения рубинов в условиях применения технологии гидроразрыва при освоении коренных месторождений корунда камерностолбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных взрывом блоков с сохранением их целостности.

Наиболее приемлемым вариантом отбойки руды для данных сложных условий высокогорья считается метод, при котором массив не подвержен воздействию взрыва или механическим ударам. Для сохранения целостности рубинов в качестве альтернативы существующим технологиям взрывной отбойки в настоящее время разрабатываются параметры разрушения горных пород и освоения коренных месторождений корунда, которые осваиваются в сложных условиях высокогорья, технологические схемы и технические способы и средства гидроразрыва горных пород.

Гидроразрыв позволяет лишь только разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения, что обосновывается в работах В. И. Клишина, М. В. Курлени, Ю. М. Леконцева, А. В. Леонтьева, С. Н. Попова, П. В. Сажина и др. Для отбойки сформированных блоков

необходимо выполнить и провести максимально щадящий взрыв на дне центрального шпура или же дополнительно нескольких шпуров, взрывная волна которого раскроет трещины гидроразрыва и отбросит блоки на некоторое расстояние на почву очистной ленты, слоя или же выработки. Автором рекомендуется проводить отбойку блоков зарядами ВВ с использованием эффекта декаплинга.

При соблюдении проектных параметров объем отбитой горной породы на одном цикле проходки составлял 10 м^3 массой 27 т, но из-за увеличения сечения выработки на 15 % масса отбитой горной породы возросла до 31 т. Появились потери при погрузке и транспортировке незапланированного объема, потребовалось дополнительное время. Площадь увеличения сечения выработки при различной длине подвигания забоя, которая зависит от радиуса зон нарушения горных пород взрывом ($R_{\text{зпп}} = 10\text{--}40 \text{ см}$). При увеличении площади сечения выработки на 15%, до $8,2 \text{ м}^2$, возрастает объем отборки горной породы и транспортировки на 0,6 т на 1 п.м проходки (1 т на 1,5 п.м проходки) при $R_{\text{зпп}} = 10 \text{ см}$.

При проведении экспериментальных исследований разработаны параметры бурогазодетонационных работ. За основу взяты параметры очистных лент (забоев) отработки горизонтальных и пологопадающих, тонких и маломощных жил камерно-столбовой системой разработки, наиболее подходящей для данных условий разработки корундовых месторождений, расположенных в горах на высоте больше 2 км.

Щадящий взрыв с эффектом декаплинга минимизирует негативное воздействие на состояние сформированных гидроразрывом блоков при отработке очистных лент при камерно-столбовой системе разработки и возмущение примыкающего породного массива с помощью следующих технических решений: уменьшения энергии взрыва на 1 м шпура; сокращения количества шпуров, в которых размещаются заряды ВВ; неполной зарядки шпура; бурения вспомогательных шпуров внутри контура взрыва для попережного гидроразрыва и проведения щадящего взрыва; выполнения детонации зарядов ВВ с замедлением для получения свободной поверхности и максимального угла отрыва.

Для достижения наибольшего эффекта щадящего взрыва необходимо уменьшить энергоемкость ВВ на 1 м шпура. Например, ВВ типа игданита имеет очень высокую мощность, однако смесь ВВ типа Impact и игданита может эффективно применяться в условиях сухих пород. В обводненных породах рекомендуется использовать патронированные ВВ, соединенные трейсерами или же другими детонирующими шнурами подходящей мощности в случае, если диаметр патрона намного меньше диаметра шпура.

С целью уточнения границ рудного тела в процессе подвигания очистных работ в рудных штреках рекомендуется периодически проводить шламовое бурение, которое осуществляется, например, с помощью бурового станка Solomatic. С интервалом 10 м бурятся три вертикальные скважины для получения геологических и геотехнических данных. Две скважины бу-

рятся таким образом, чтобы они пересекали контакт с рудным телом в центральной части подэтажа, одна направлена в сторону висячего бока, другая – в сторону лежачего бока. Третья скважина бурится в центре рудного тела.

Погрузка отбитой руды осуществляется с помощью дистанционно управляемой погрузочно-доставочной машины (ПДМ). Производительность ПДМ: 80 т/ч при дистанционно управляемой погрузке и 120 т/ч при управляемой погрузке. Руда доставляется в камеру временного складирования, расположенную в квершлага. В дальнейшем руда из камеры грузится в подземные автосамосвалы и транспортируется. Закладку из пустых пород доставляют в выработанное пространство с вышележащего штрека в подэтаже. Цикл операций повторяют до завершения отработки подэтажа. Затем очистные работы переходят на вышележащий подэтаж.

Бурение нисходящих скважин производится с вышележащего штрека станками ударно-вращательного бурения с погружными пневмоударниками, которые обеспечивают направленное и безопасное бурение параллельных скважин. Взрывные скважины бурятся следующим образом: по две скважины со стороны висячего и лежачего боков в каждом отбиваемом слое, одна скважина в центре каждого слоя. Скважины в лежачем и висячем боках бурятся на экспериментально определенную глубину от контакта с рудным массивом, в крепких и слабых вмещающих породах соответственно лежачего и висячего боков для обеспечения полной выемки крепкой руды и предотвращения нежелательного разубоживания.

Разработанный вариант отработки крутопадающих маломощных жил уступной выемкой с отбойкой руды нисходящими скважинными зарядами ВВ, с полной механической закладкой выработанного пространства пустыми породами позволяет вести наиболее полную выемку запасов полезного ископаемого в восходящем порядке от нижней границы рудного участка в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Эффективность горных работ достигается за счет высокой производительности системы разработки; возможности одновременной отработки трех-четырех подэтажей; бурения и заряжания скважин с вышележащего штрека в подэтаже; применения современного бурового оборудования, разработанного в ИГД СО РАН; отсутствия необходимости оставления потолочных целиков; возможности вести очистные работы в условиях неустойчивых вмещающих горных пород висячего бока за счет тросового анкерного крепления массива; безопасной погрузки отбитой руды из очистного пространства и др.

После образования инициирующих трещин необходимо провести герметизацию шпура. Наиболее эффективно использовать для этих целей серийно выпускаемые герметизаторы для скважин (шпуров) малого диаметра механического типа. Шпуры продольного гидроразрыва необходимо загерметизировать у устья, а для поперечного – как можно ближе к инициирующей трещине. Разница между герметизаторами продольного и попереч-

ного гидроразрыва лишь в размерах удлинителя, поскольку во всех случаях штуцер для подачи расклинивающего агента должен быть вынесен из шпура.

Для сохранения рубинов при освоении коренных месторождений корунда камерностолбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных гидроразрывом блоков.

В шестой главе обоснован механизм селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения полезного компонента.

Процесс добычи и переработки полезных ископаемых сопровождается стадиями дробления и измельчения с целью извлечения ценных минералов. Проблема селективной дезинтеграции особенно актуально стоит при добыче сырья для ювелирных целей и обрабатывающей промышленности, где ценность размеров конечного продукта трудно переоценить. Например, при добыче минералов семейства корунда (рубины, сапфиры) нахождение корунда часто связано с корундовыми сиенитами и сиенит-пегматитами, образующими дайки и жилы в толщах щелочных сиенитов или же гранито-гнейсов и гнейсов вблизи контактов их с массивами щелочных или нефелиновых сиенитов. Такими являются месторождения Ильменских и Вишневых гор на Южном Урале (Россия). Интересно месторождение массива Рай-Из на Полярном Урале, где карминово-красный корунд с размерами кристаллов до 20 см приурочен к дайкам плагиоклазитов, преимущественно к слюдитовым зонам. Метаморфические мусковит-силлиманит-корундовые и кианит-корундовые породы в гнейсах и кристаллических сланцах известны в Якутии (месторождение Чайныт).

Особого внимания заслуживают месторождения корунда, главным образом рубина, в метаморфизованных мраморах. Они образуются в результате контактового метасоматоза при внедрении магматических пород, как правило, основного состава, в карбонатных толщах. Примером месторождений такого типа может служить Кучинское месторождение на Южном Урале.

Используемые на практике машины для дробления материалов в зависимости от назначения и принципа действия реализуют такие методы разрушения, как раздавливание, ударное воздействие, раскалывание и излом. При этом одновременно могут реализовываться несколько механизмов разрушения в зависимости от режимов работы дробилок.

Представлена методика расчета критерия эффективности селективного дробления горных пород, применимая для сопоставительного анализа эффективности в задачах извлечения из горных пород ценных минералов без их переизмельчения. В качестве результативного критерия использовано отношение энергии формоизменения на поверхности ценного минерала к этой энергии внутри его объема. На основе результатов компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении наибольшего эффекта се-

лективной дезинтеграции при дроблении породы «в слое», что достигается в условиях равномерного всестороннего сжатия. Выполнены лабораторные эксперименты, которые подтвердили реализацию механизма селективного дробления материнской породы мрамора с включениями корунда и рубина.

При моделировании воспользуемся геометрической моделью зерна минерала в виде эллипсоида вращения. В качестве критерия сохранности зерна, при котором трещины распространяются вдоль границы с материнской породой, принимаем отношение энергии формоизменения вблизи поверхности эллипсоида к этой же энергии в его объеме. Энергия формоизменения, выраженная через главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, имеет вид

$$U_m = \frac{1}{4G} [(\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2], \quad (1)$$

где σ – среднее нормальное напряжение, Па:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3};$$

G – модуль сдвига, Па.

Критерий сохранности зерна выглядит так

$$\chi = \frac{U_{2m_1}}{U_{3m_2}} \quad (2)$$

где U_{m_1} – энергия формоизменения в поверхностном слое над поверхностью эллипсоида; U_{m_2} – удельная энергия формоизменения зерна, Дж/м³.

При моделировании напряженно-деформированного состояния среды при различных условиях разрушения использован пакет COMSOL Multiphysics. Рассмотрена модель среды с единичным зерном (ценный минерал) в виде эллипсоида вращения, заключенного в матрицу (вмещающая порода). Принималось, что толщина поверхностного слоя над поверхностью зерна составляла 10% от минимальной полуоси эллипсоида.

В качестве примера рассмотрен вариант, аналогичный структурному расположению минерала корунда внутри матрицы материнской породы – мрамора. В случае модуль полной деформации минерального зерна принимаем равным $E_3 = 8 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu_3 = 0,2$; для материала матрицы примем $E_2 = 4 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu_2 = 0,3$. Размеры малых полуосей эллипсоида вращения - 0,005 м; большая полуось - 0,01 м. Матрица представлена кубиком со сторонами 0,1 м.

Для одноосного напряженного состояния, характерного для процесса дробления в щековой дробилке получено, что при величине сжимающих напряжений 10 МПа в направлении большой полуоси эллипса внутри зерна реализуются большие напряжения Мизеса.

Следовательно, вариант дробления в щековой дробилке, очевидно, приводит к переизмельчению ценных минералов. В частности удельная энергия формоизменения в выделенном объеме вокруг эллипсоида составляет $U_{2m} = 1,96 \cdot 10^6$ Дж/м³; эта же энергия внутри эллипсоида равна $U_{3m} = 1,64 \cdot 10^6$ Дж/м³. Следовательно, критерий эффективности селективного разрушения в варианте использования щековой дробилки составляет

$$\chi = \frac{U_{2m_1}}{U_{3m_2}} = \frac{1,96 * 10^6}{1,64 * 10^6} = 1,19$$

По данной методике выполнены аналогичные расчёты для варианта двуосного напряженного состояния, характерного для механизма разрушения в валковой дробилке. Расчетная величина критерия сохранности зерна составляет $\chi = 1,38$ и является более эффективным для селективного разрушения. В случае трехосного равномерного сжатия величиной 10 МПа $\chi = 4,39$.

Установлено, что трехосный режим разрушения имеет более высокий эффект селективного разрушения по сравнению с одноосным режимом (табл. 9).

Таблица 9 – Результаты моделирования

№ п/п	Механизм дробления	Внешние напряжения	Эффективность селективного разрушения
1	Конусная дробилка – раскалывающие сосредоточенные напряжения на противоположных гранях	Одноосное сосредоточенное напряженное состояние: $P_x = P_y = 0; P_z = 10$ МПа	1,18
2	Щековая дробилка – распределенные напряжения на противоположных гранях	Одноосное напряженное состояние: $P_x = P_y = 0; P_z = 10$ МПа	1,19
3	Валковая мельница – распределенные напряжения по двум осям	Двухосное напряженное состояние: $P_x = 0; P_y = P_z = 10$ МПа	1,38
4	Молотковая дробилка	Удар с силами инерции: $P_x = 0; P_y = 0; P_z = 10$ МПа	1,65
5	Дробление в закрытом сосуде, заполненном песком	Трехосное равномерное сжатие: $P_x = P_y = P_z = 10$ МПа	4,39

Выполнены лабораторные эксперименты, которые подтвердили реализацию механизма селективного дробления материнской породы мрамора с включениями корунда и рубина на примере месторождения Снежное.

В седьмой главе показаны способы извлечения из разрушенной массы кристаллов корунда, основанные на их спектральных характеристиках.

В мировой практике при извлечении самоцветов из дробленной массы руд основными свойствами, определяющими выбор необходимого метода,

является минеральный состав породы, крепость породы и слагающих минералов, твердость минералов, их вязкость и хрупкость. Из плотных коренных базальтов, мраморов, гнейсов добыча самоцветов производится с использованием буровзрывных работ, что отражается на стоимости добычи, которая становится нерентабельной, а добытое сырье приобретает дефекты из-за образования в кристаллах мелких техногенных трещин. Важной проблемой при разработке коренных месторождений во избежание повреждения крупных кристаллов корунда является выбор метода и способа разрушения пород. Недостатками механических способов рудоподготовки являются большие потери естественных кристаллов и существенное снижение их качества. Анализ патентной информации и литературных данных показал, что на практике широко используется способ разупрочнения горных пород путем направленного изменения свойств горной породы, в том числе и поверхностно-активными веществами. Мировой опыт, практика российских компаний и многочисленные научно-исследовательские разработки доказывают эффективность магнитной сепарации при обогащении самоцветов. Электрические способы, основанные на различии в электрических свойствах минералов, в величине и знаке зарядов, приобретаемых минералами, в проводимости и диэлектрической проницаемости, промышленностью слабо освоены. Одним из перспективных методов и способов извлечения является оптическая сепарация. Например, в настоящее время месторождение Снежное обрабатывается полукустарными методами, при которых большое количество самоцвета разрушается при добыче.

Для корунда основная длина волны люминесценции 693 нм, сопровождается вторичными пиками на 706 нм и 714 нм справа и 660 нм и 670 нм слева. На основании анализа спектров (рис. 8) можно сделать предположение, что образцы с указанным пиком люминесценции являются наиболее чистыми корундами.

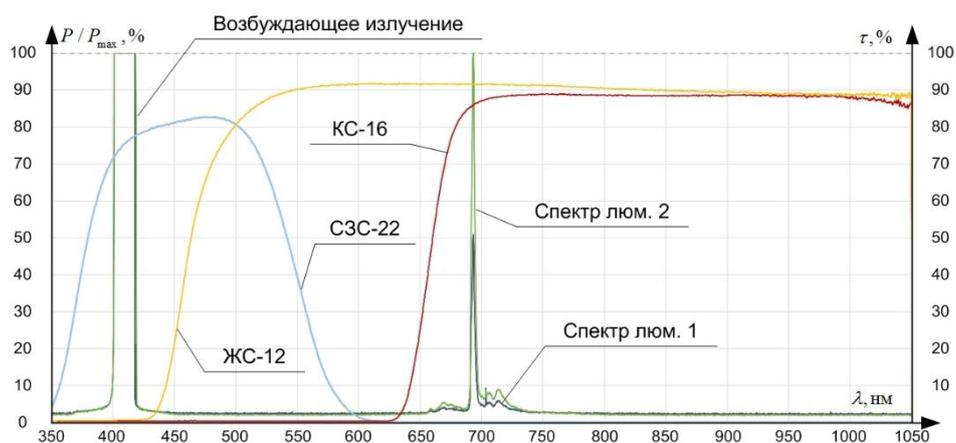


Рисунок 8 – Спектры излучения люминесценции идеального корунда и спектры пропускания фильтров

Как показывает практика, появление люминесценции корунда можно заметить даже под микроскопом, однако зафиксировать её при помощи

камеры, присоединённой к микроскопу не удалось. Визуально эффект люминесценции хорошо наблюдается при помощи следующих фильтров: желтого стекла (ЖС-12) или красного стекла (КС-16), – спектральные распределения коэффициентов пропускания которых приведены на рис. 9. Указанные фильтры эффективно отсекают возбуждающее излучение мощного лазерного диода и пропускают излучение люминесценции корунда. В ходе экспериментальных исследований спектров излучения различных минералов удалось установить, что пик на 693 нм (рис. 9) связан с люминесценцией корунда, вызванной излучением на длине волны в 405 нм (глубокий синий цвет). Источник, который использовался для проведения эксперимента (универсальный источник излучения ecoVIS фирмы [Ocean Optics](#) с криптоновой лампой накаливания) тоже имеет составляющую излучения в области синий цветов, что и вызвало люминесценцию некоторых образцов. Для выявления люминесценции использовался фиолетовый лазерный диод с пиком излучения на 405 нм.

В качестве примера на рис. 9 приведены результаты анализа спектров корунда в образцах месторождения Снежное.

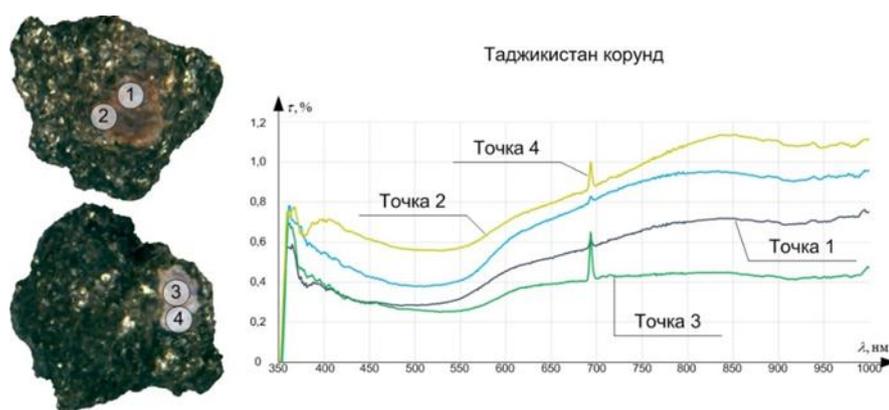


Рисунок 9 – Спектры отражения областей образцов месторождения Снежное

Области 1 и 2 характеризуются спектральными зависимостями, имеющими значительное увеличение отражения в области жёлтых оттенков, постепенно увеличивающееся в области красных оттенков и ближней ИК области спектра (от 580 нм до 850 нм). Данные спектры имеют едва заметный пик люминесценции корунда на длине волны в 693 нм (рис. 9). Указанные зависимости характеризуются слабо насыщенными красно-оранжевыми оттенками. На спектрах участков 3 и 4 присутствуют выраженные узкие пики люминесценции на длине волны в 693 нм, кроме того, заметны вторичные пики люминесценции на 706 нм и 714 нм. Однако на указанных спектрах отсутствует выраженное увеличение отражения в области синих оттенков спектра (от 450 нм до 500 нм), характеризующее слабо насыщенные розовато-лиловые оттенки.

Таблица 10 - Значения порогов выделения областей, принадлежащих корунду в цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS

Объект	Группа образцов	Цветовое пространство RGB					
		R0	радиус R	G0	радиус G	B0	радиус B
Хитостров	1	124	40	101	20	133	40
		90	40	85	20	103	40
		85	40	61	20	90	40
	2	40	101	20	133	40	
		40	85	20	103	40	
		40	61	20	90	40	
	3	25	20	30	15	50	20
	4	60	20	60	20	70	20
	5	40	20	35	5	40	20
15		10	20	5	25	10	
Снежное	Корунд ювелирный	45	30	50	30	45	30
	Мелкий кристалл корунда	100	40	75	30	108	40
	1	80	20	60	20	25	20
		70	20	33	20	15	20
	2	110	30	90	30	110	30
		70	30	70	30	75	30
		Цветовое пространство Yuv					
		Y	u		v		
Хитостров	1	[1; 70)	[0; 4,36)		[-0,12; 6,15)		
	2	[1; 70)	[0; 4,36)		[-0,12;6,15)		
	3	[6; 25)	[0; 15; 4,36)		[-0,6; 0,4)		
	4	[10; 60)	[-0, 1; 4,36)		[-0,6; 6,15)		
	5	[5; 30)	[0; 0,4)		[-0,25; 0,2)		
Снежное	Корунд ювелирный	[11;40)	[-0,3;0,2)		[-0,3;0,2)		
	мелкий кристалл корунда	[11; 60)	[0; 4,36)		[0; 6,15)		
	1-2	[10; 80)	[-0,5; 4,36)		[0; 6,15)		
		Цветовое пространство HLS					
		H	L		S		
Хитостров	1	[220; 360)	[1; 70)		[1;100)		
	2	[220; 360)	[1; 70)		[1;100)		
	3	[200; 300)	[1; 25)		[5;100)		
	4	[150; 250)	[12; 60)		[1;100)		
	5	[180; 360)	[3; 15)		[1;45)		
Снежное	Корунд ювелирный	[0; 360)	[10; 35)		[1;40)		
	Мелкий кристалл корунда	[220; 360)	[10; 60)		[5;100)		
	1	[0; 100)	[10; 35)		[10; 100)		
	2	[200; 360)	[15; 100)		[1; 100)		

При проведении исследований по обогащению корундсодержащих руд месторождений Хитостров и Снежное проанализированы структурные

особенности пород и физико-химические характеристики минералов. Установлены пороги выделения областей, принадлежащих корунду, в наиболее распространенных для использования цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS и возможности применения при обогащении оптической сортировки.

Сложность оценки эффективности выделения областей корунда на изображениях для полиминеральных образцов связана с тем, что многокомпонентный цвет вмещающей породы перекликается с выделяемыми оттенками корунда.

Заключение

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности добычи и полноты извлечения запасов минералов корундовой группы в сложных условиях высокогорья, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие горнопромышленной отрасли страны и геологической науки в целом.

Основные научные и практические результаты, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1 Обосновано, что полигенные корундообразующие комплексы должны использоваться в промышленной классификации месторождений твердых полезных ископаемых как новые классы промышленного сырья группы «корунд» – коры выветривания и россыпи.

2 Произведена комплексная горно-геологическая оценка месторождений корундов, базирующаяся на их генетической типизации и классификации, позволяющая определить целесообразность дальнейшего освоения этих месторождений.

3 Изучены закономерности взрывного дробления руды и разрушения вмещающих пород, на основе которых установлена рациональная схема отбойки руды вертикальными слоями с параллельным, иногда веерным, расположением скважин диаметром 65 мм. Экспериментальные работы выполнены в производственных условиях.

4 Изучены на экспериментальном уровне свойства отходов производства и рекомендован к использованию активный заполнитель – песок, значительно сокращающий расход вяжущих материалов.

5 Показано, что закладка выработанного пространства твердеющей смесью при разработке рудных тел сложной формы улучшает технико-экономические показатели и способствует расширению его производственной мощности.

6 Для крутопадающих маломощных проявлений благородного корунда предложен вариант камерно-целиковой системы разработки с отбойкой руды из поэтажных выработок и последующей закладкой для выемки участков рудных тел мощностью более 5 м.

7 Показана эффективность горных работ с применением варианта отработки крутопадающих маломощных жил уступной выемкой с отбойкой руды нисходящими скважинными зарядами ВВ, с полной механической закладкой выработанного пространства пустыми породами.

8 Для сохранения целостности кристаллов благородных корундов при освоении коренных месторождений рекомендуется применение технологии гидроразрыва, позволяющего разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения.

9 Впервые для сложных горно-геологических условий высокогорья предложена технология формирования и отработки техногенных месторождений корунда, позволяющая создать техногенное месторождение совместно с формированием отвала горных пород максимальной емкости и устойчивости, а также повысить экологическую безопасность проводимых горных работ и обеспечить максимальное извлечение полезного компонента при последующем выщелачивании созданного техногенного месторождения.

10 Одним из путей повышения технико-экономической эффективности обогатительного передела является реализация селективной дезинтеграции, что позволяет увеличить выход минерального сырья и снизить энергозатраты за счет снижения степени измельчения при увеличении размеров конечной фракции.

11 Для разработки руд месторождения Снежное предложена перспективная технология, включающая щадящее последовательное дробление в щековой дробилке, классификацию и рудоразборку для удаления пустой породы и выборки крупных кристаллов в модуле рудоподготовки, а для уменьшения потерь корунда при добыче была оценена возможность термодробления руды.

12 Предложен метод расчета эффективности селективного дробления с использованием различных режимов силового воздействия.

13 Предложенная замена обычной закладки на закладку твердеющей смесью, приготовленной из доменных шлаков и пирротиновых хвостов обогатительных фабрик с упрочняющими добавками, приводит к уменьшению потерь и разубоживания и эффективно применяется на месторождении «Снежное» и «Кухи-Лаъл» ОАО «Чамаст» Министерства промышленности и новых технологий Республики Таджикистан.

**Список опубликованных научных работ Н.Г.Барнова по теме
диссертации (лично и в соавторстве)**

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Барнов Н.Г., Щипцов В.В., Бубнова Т.П. Геологическая и минералого-технологическая характеристика корундосодержащих пород на примере проявления Хитостров (Северная Карелия) // Труды Карельского НЦ РАН . - 2023.-№2 - С.39-52
2. Барнов Н.Г., Щипцов В.В. Генетические типы корундов //Журнал «Вестник Геонаук» – 2022 – № 9. – С.3-14
3. Щипцов В.В., Барнов Н.Г. Типология рубинов и их промышленное значение //Горная промышленность. – 2021. – № 6. – 64-69.
4. Барнов Н.Г., Щипцов В.В. Сводный обзор месторождений и крупных проявлений благородных корундов мира // Труды Карельского НЦ РАН. – 2021. – № 10. – С. 78–87.
5. Барнов Н.Г., Эквист Б.В. Взрывное разрушение массив горной породы с неоднородной структурой // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 135–138.
6. Бубнова Т.П., Барнов Н.Г., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Характеристики вещественного состава, определяющие обогатимость корундосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 162–174.
7. Барнов Н.Г., Каркашадзе Г.Г. Обоснование механизма селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения цельного камнесамоцветного сырья // Горный журнал. –2017.– № 1.– С. 47–49.
8. Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С. Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 3. – С. 200–209.
9. Барнов Н.Г., Мельников Е.П., Викторов М.А. Минералогия месторождения благородных корундов мира // Отечественная геология. – 2016. – № 1. – С. 39–45.
10. Еременко В.А., Барнов Н.Г., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Способ разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
11. Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Разработка технологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015.– Спец. выпуск 60-1.– С.7–19.
12. Барнов Н.Г., Мельников Е.П. Генетические типы благородных корундов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 79–85.
13. Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Обоснование параметров геотехнологии освоения коренных ме-

- сторождений корунда в сложных условиях высокогорья // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 42–47.
14. Еременко В.А., Карпов В.Н., Тимонин В.В., Барнов Н.Г., Шахторин И.О. Основные направления развития бурового оборудования для системы разработки с этажным принудительным обрушением руды. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 6. – С. 49–64 .
 15. Барнов Н.Г., Мельников Е.П., Викторов М.А. Типоморфизм рубинов и сапфиров // Отечественная геология -2015.- №4.- С.42-59.
 16. Барнов Н.Г. Промышленная минерализация рубиноносной зоны месторождения Снежное (центральный Памир) // Отечественная геология. – 2014. – № 3. – С. 59–61.
 17. Барнов Н.Г. Типы рубиновой минерализации на примере месторождения Снежное // Руды и металлы. – 2014. – № 3. – С. 47–59.
 18. Барнов Н.Г. Геммохронология корунда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 11. – С. 8.
 19. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. Генетические типы скаполита музкольской метаморфической серии (Центральный Памир) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2011. – № 1. – С. 23–29.
 20. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. Геолого-структурная позиция месторождений рубина в мраморах Центрального Памира (Республика Таджикистан) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №6. – С. 56-57.
 21. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. История памирских самоцветов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – №4. – С. 70-74.
 22. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. Генетическая модель месторождения рубина Снежное (Центральный Памир) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 4. – С. 107–110.
 23. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. Морфологические и морфометрические особенности рубиновой минерализации месторождения Снежное (Восточный Памир) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 7. – С. 57–58.

Публикации в прочих изданиях:

24. Barnov N.G. Genetic types of corundum /V.V.Shchiptsov, N.G.Barnov //Vestnik of geosciences – 2022. – № 9. – Pp. 3–14.
25. Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Барнов Н.Г. Минеральные примеси, определяющие прочностные характеристики корунда хитост-

- ровского проявления (Респ.Карелия) // Стратегия развития геологических исследований недр. 2018 г. - №1. - С.17.
26. Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Барнов Н.Г., Бучкина О.В. Минералогические критерии оценки качества корунда на примере проявления Хитостров (Северная Карелия) // XIII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». 2017. – С. 18–19.
27. Барнов Н.Г., Еременко В.А. Разработка крутопадающих мало-мощных жильных месторождений с применением технологии гидроразрыва // «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр»: Материалы 2-й Междунар. науч. школы академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН, 2016. – С. 169–172.
28. Барнов Н.Г., Раджабов М.М., Чихладзе В.В. Оценка влияния метода дезинтеграции на селективность раскрытия корундосодержащих руд // «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения-2016): Материалы междунар. конф., 26–30 сентября 2016 г. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2016. – С. 40–41.
29. Барнов Н.Г. Минеральный состав и структура месторождения рубина Снежное (Центральный Памир)// Липецк. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей. – 2010. – Вып. 7. – Ч. 1. – С. 26–30.
30. Мельников Е.П., Барнов Н.Г. Минералогия важнейших месторождений благородных корундов мира // «Неделя горняка-2015»: материалы междунар. науч. симпозиума. – М.: Горная книга, 2015. – С. 128.
31. Еременко В.А., Барнов Н.Г., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Применение технологии гидроразрыва для освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья // Современные проблемы механики, энергоэффективность сооружений и ресурсосберегающие технологии: Сб. тр. науч. школы-семинара молодых ученых и студентов с междунар. участием. – М.: РУДН, 2015. – С. 290–298.
32. Мельников Е.П., Барнов Н.Г. Уникальность геологии и минералогии месторождения «Снежное» // «Неделя горняка-2014»: материалы междунар. науч. симпозиума. – М.: Горная книга, 2014. – № 1. – С. 122.

33. Барнов Н.Г., Мельников Е.П. Геммологические характеристики благородных корундов важнейших месторождений мира // «Неделя горняка-2012»: материалы междунар. науч. симпозиума. – М.: Горная книга, 2012. – С. 130.

Патенты:

1. Патент №2699097 Российская Федерация МПК E21C 41/26 (2006.01), СПК E21C 41/26 (2006.01) Способ формирования техногенного месторождения и его последующей отработки. №2019112392: заявл. 23.04.2019 г., опубликовано 03.09.2019 г. / Барнов Н.Г. / Патентообладатель НИТУ «МИСИС» – 2 с.

2. Патент № 2634597 Российская Федерация E 21C 37/06 (2006.01), F42D 1/08 (2006.01), Способ проходки горных выработок и ведения очистных работ. № 2016128958: заявл. 07.15.2016 г., опубликовано 11.01.2017 г. / Еременко А.А., Есина Е.Н., Кондратенко А.С., Барнов Н.Г., Тимонин В.В. / Патентообладатель ИПКОН РАН. – 8 с.

3. Патент №2598009 Российская Федерация МПК E 21C 39/00 (2006.01) Внутрискважинный способ определения направления действия и значений главных напряжений. № 2015127462: заявл. 09.07.2015 г., опубликовано 20.09.2016 г. / Еременко В.А., Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Лушников В.Н., Семенякин К.Н., Кондратенко А.С., Барнов Н.Г. Патентообладатель ФГБУ ИПКОН РАН – 8 с.